



Conception d'un environnement virtuel avec adaptation de l'immersion pour la simulation de conduite en fauteuil roulant

Frédéric Goncalves

► To cite this version:

Frédéric Goncalves. Conception d'un environnement virtuel avec adaptation de l'immersion pour la simulation de conduite en fauteuil roulant. Automatique / Robotique. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014. Français. <NNT : 2014VERS0045>. <tel-01251566>

HAL Id: tel-01251566

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01251566>

Submitted on 6 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

présentée par

Frédéric Goncalves

pour obtenir le grade de

Docteur en Robotique et Réalité Virtuelle

Conception d'un environnement virtuel avec adaptation de l'immersion pour la simulation de conduite en fauteuil roulant

Soutenance prévue le 29/09/2014

Devant le jury composé de :

M. Guy BOURHIS, Professeur, LCOMS.....Rapporteur
M. Simon RICHIR, Professeur, Arts et Métiers ParisTech CER Angers.....Rapporteur
M. Éric MONACELLI, Maître de Conférences, UVSQ.....Directeur de Thèse
M. Alain SCHMID, Ingénieur de Recherche, EDF R&D..... Responsable Scientifique EDF
M. Frédéric MAGOULES, Professeur, Ecole Centrale Paris.....Examineur
M. Yasser ALAYLI, Professeur, UVSQ.....Examineur
M. Benjamin MALAFOSSE, Ergonome, CEREMH.....Invité

Résumé

Cette thèse porte sur l'adaptation de l'immersion lors de la simulation de conduite en fauteuil roulant. Il s'agit d'étudier le réalisme des retours sensoriels impliqués dans un environnement virtuel afin de pouvoir adapter l'immersion en fonction des préférences de l'utilisateur et de la tâche à accomplir. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet *AccesSim* soutenu par la région Ile-de-France. L'objectif du projet est de développer un simulateur dynamique pour évaluer l'accessibilité d'environnement urbain et également, de procéder à l'entraînement à l'usage de fauteuils roulants.

Dans le cadre de la conduite en fauteuil roulant, il est nécessaire que le comportement de conduite soit cohérent entre une situation réelle et une situation simulée. Pour cela, il faut que l'environnement virtuel et les retours sensoriels soient suffisamment immersifs et réalistes. Notre proposition est de spécifier une configuration immersive en adaptant les retours haptiques et visuels du simulateur. Nous avons validé cette hypothèse à l'aide du simulateur développé dans le cadre du projet *AccesSim*.

Dans la première partie de la thèse, la contribution porte sur la conception du simulateur *AccesSim*. Cette conception porte sur l'environnement logiciel en charge des fonctionnalités innovantes : aide au diagnostic d'accessibilité et navigation 3D en fauteuil roulant à l'aide d'un modèle dynamique de fauteuil roulant. Pour permettre une navigation en fauteuil roulant, le simulateur est couplé à une plateforme robotique intégrant des retours haptiques et vestibulaires.

La seconde partie de la thèse porte sur l'analyse du comportement de conduite des utilisateurs. Il s'agit de comparer la conduite en situation réelle et en situation virtuelle en fonction de la configuration du simulateur. Cette analyse montre la sensibilité des résultats vis-à-vis des profils des usagers et de l'immersion.

Enfin, nous avons étudié les différents retours sensoriels participant à la qualité de l'immersion. Le premier retour concerne le sens vestibulaire. Il est dépendant des retours haptiques du simulateur robotique. Ce retour sensoriel supplémentaire doit permettre d'améliorer les performances de conduite de l'utilisateur. Nous avons évalué la perception de ce retour sur la base d'une tâche de descente d'une marche à l'aide d'un fauteuil roulant. Dans la thèse, nous avons montré les performances de notre solution ainsi que le besoin d'adapter ce retour haptique pour chaque utilisateur.

Le second retour sensoriel étudié concerne les retours visuels. Nous avons proposé une configuration d'immersion visuelle modulable. Elle permet une immersion plus ou moins égocentrée. En analysant les trajectoires d'utilisateurs effectuées avec les différentes configurations d'immersion, nous pouvons évaluer la configuration la plus efficace en fonction de l'environnement et des préférences de chaque utilisateur.

Ces deux études sur les retours sensoriels ont été basées sur des évaluations avec deux groupes d'utilisateurs : un groupe d'expert (thérapeutes et ergonomes) et un groupe de personnes en situation de handicap.

Abstract

This thesis focuses on the adaptation of the immersion in a driving wheelchair simulation. This is the study of sensory feedback realism involved in a virtual environment in order to adapt the immersion according to user preferences and the task to perform. These works were performed within the *AccesSim* project supported by the Ile de France region. The project objective is to develop a dynamic simulator to evaluate the accessibility and also urban environment, to conduct training in the use of wheelchairs.

In the context of wheelchair driving, it is necessary that the driving behavior is consistent between a real situation and a simulated situation. To do this, we need the virtual environment and the sensory feedback to be sufficiently realistic and immersive. Our proposal is to specify an immersive configuration adapting haptic and visual feedback from the simulator. We validated this hypothesis using the simulator developed within the *AccesSim* project.

In the first part of the thesis, the contribution focuses on the design of the *AccesSim* simulator. This design focuses on the software environment responsible for the innovative features: assistance for accessibility diagnosis and 3D navigation with a wheelchair using a dynamic model. To enable navigation in a wheelchair, the simulator is coupled to a robotic platform integrating haptic and vestibular feedback.

The second part of the thesis focuses on the analysis of driving behavior of users. It comes to comparing the driving in real and virtual situation depending on the configuration of the simulator. This analysis shows the sensitivity of results towards profiles of users and immersion.

Finally, we studied the different sensory feedback involved in the quality of immersion. The first feedback concerns the vestibular sense. It depends on haptic feedback simulator. This additional sensory feedback should improve driving performance of the user. We evaluated the perception on the basis of a task consisting in going down a step using a wheelchair. In the thesis we have shown the performance of our solution and the need to adapt the haptic feedback for each user.

The second sensory feedback investigated concerns visual feedback. We proposed a modular configuration of visual immersion. It allows immersion more or less egocentric. By analyzing the trajectories of users performed with the different configurations of immersion, we can evaluate the most efficient configuration depending on the environment and preferences of each user.

These two studies on sensory feedback were based on evaluations with two groups of users: an expert group (therapists and ergonomists) and a group of people with disabilities.

Remerciements

Ces quelques lignes particulières me permettent de remercier une partie des personnes ayant permis l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais remercier Eric Monacelli pour m'avoir accompagné et soutenu jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Sous sa direction, il m'a été permis de mieux comprendre et apprécier les travaux de recherche menés au sein du laboratoire. Sa disponibilité et son écoute tout au long de ces trois années de travail ont générés de nombreuses discussions enrichissantes. Je le remercie pour sa patience et tout ce qu'il a pu m'apprendre au cours de cette thèse.

Je voudrais remercier Alain Schmid d'avoir co-encadré ce travail. Il m'a permis d'intégrer une équipe de R&D dans un milieu industriel. Je le remercie de la confiance qu'il m'a accordée. Les nombreuses discussions que nous avons eues ont permis d'améliorer quotidiennement ma contribution au projet *AccesSim*.

Je voudrais remercier tous les thésards que j'ai pu rencontrer pendant ces trois ans. Notamment Guillaume pour m'avoir épaulé et guidé durant les premières années de ma thèse. Lambert et Nicolas pour avoir su préserver mon moral et l'ambiance de travail.

Je remercie l'équipe « Assistance et Interactions » du LISV ainsi que l'équipe « Réalité Virtuelle et Visualisation Scientifique » d'EDF pour leur accueil et leur collaboration tout au long de ma thèse.

Je remercie le personnel du CEREMH pour leur participation dans ce travail. Plus spécialement Benjamin Malafosse et Pierre-Antoine Leyrat pour leurs précieux conseils lors de la réalisation des expérimentations.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse M. Guy Bourhis et M. Simon Richir pour le temps qu'ils ont consacré à lire mon manuscrit et y apporter leurs critiques. Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Sommaire

Chapitre 1 Introduction.....	1
I. Handicap et réglementation	2
II. La réalité virtuelle.....	5
III. Problématique.....	8
Chapitre 2 Les simulateurs de fauteuils roulants.....	9
I. Introduction.....	10
II. Recherche et applications	12
1. Préconisation de matériel	13
2. Evaluation de l'environnement et/ou de l'individu	15
3. Entrainement.....	17
III. Interface de commande et retours sensoriels	19
1. Les organes de commandes	19
2. Retours sensoriels	22
IV. Synthèse	25
Chapitre 3 Conception de la plateforme <i>AccesSim</i>	27
I. Objectifs	28
II. Conception	30
1. Environnement logiciel.....	30
2. Plateforme robotique.....	33
III. Fonctionnalités.....	38
1. L'aide au diagnostic d'accessibilité.....	38
2. La navigation virtuelle en fauteuil roulant	40
Chapitre 4 Analyse de comportements.....	44
I. Introduction.....	45
II. Evaluation de performances	46
1. Méthodologie d'évaluation.....	46
2. Application dans un cas réel.....	47
3. Extension à un environnement virtuel	50
4. Comparaison des résultats.....	51
III. Perception et retours sensoriels	54
1. Parcours de test.....	55
2. Simulation et retours sensoriels.....	56

3. Population	56
4. Résultats	56
IV. Synthèse	58
Chapitre 5 Adaptation des retours haptiques.....	62
I. Démarche	63
1. Système de capture de mouvement	64
2. Contrôle du mouvement	64
3. Marche virtuelle et réelle.....	67
II. Résultats	69
1. Données inertielles.....	69
2. Retours utilisateurs – Etape 1	70
3. Retours utilisateurs – Etape2	71
III. Adaptation.....	73
Chapitre 6 Adaptation de retours visuels.....	76
I. Configuration de visualisation.....	77
II. Configurations de l’immersion visuelle	80
1. Vue de face(VF)	80
2. Vue Workbench (VW).....	80
3. Vue par jupe (VJ)	81
4. Caméra virtuelle et champ de vision.....	82
III. Démarche	84
1. Description des parcours.....	85
2. Population	87
3. Données.....	87
4. Questionnaire utilisateur	88
IV. Résultats	90
1. Ressenti des sujets	90
2. Trajectoires.....	91
V. Adaptation.....	98
Chapitre 7 Conclusion	101
Annexes.....	106
Annexe 1 – La classification Fuzzy C-Means.....	107
Annexe 2 – Tests non paramétriques.....	108
1. Le test de Wilcoxon	108

2. Le test de Kruskal-Wallis	108
Annexe 3 – Résultats de l'étude concernant les retours visuels.....	109
1. Couloir avec descente de marche	109
2. Slalom	111
3. Virage avec passage de portes	117
Bibliographie.....	122

Liste des abréviations

ADA : Americans with Disabilities Act

AFNOR : Association Française de Normalisation (Association)

ANOVA : ANalysis Of VAriance

AVC : Accident Vasculaire Cérébrale

BCI : Brain Computer Interface

CAD : Computer-Aided Design

CEA : Commissariat à l’Energie Atomique et aux énergies alternatives (organisme de recherche scientifique)

CER : Centre d’Enseignement et de Recherche

CEREMH : Centre de Ressources & d’Innovation Mobilité Handicap (Association)

CIF : Classification Internationale de Fonctionnement du handicap

CIH : Classification Internationale du Handicap

EDF : Electricité De France (Entreprise)

EEG : Électro-Encéphalographie

ERP : Établissements Recevant du Public

EV : Environnement Virtuel

FCM : Fuzzy C-Means Classification

FOV : Field of View (Champ de Vision)

FRE : Fauteuil Roulant Electrique

FUI : Fond Unique Interministériel

GUI : Graphical User Interface (Interface Graphique Utilisateur)

HMD : Head Mounted Display

IOP : Installations Ouvertes au Public

LCOMS : Laboratoire de Conception, Optimisation et Modélisation des Systèmes (Laboratoire)

LISV : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (Laboratoire)

MMF : Memory Mapped File

OMS : Organisation Mondiale de la Santé (Institution)

ONU : Organisation des Nations unies (organisation internationale)

PC : Personal Computer

PMR : Personne à Mobilité Réduite

PR : Plateforme Robotique

PT : Plateforme de Test

RR : Réalité Réelle

RV : Réalité Virtuelle

UFR : Utilisateur de Fauteuil Roulant

UVSQ : Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (Université)

VF : Vue de Face

VJ : Vue par Jupe

VW : Vue Workbench

WPF : Windows Presentation Foundation

WST-P : Wheelchair Skills Training Program

Chapitre 1

Introduction

La législation française implique une forte demande de mise en conformité des projets urbains. Cela demande aux collectivités et architectes de connaître les normes d'accessibilité en vigueur et les problèmes liés aux situations de handicap. Des techniques permettent de créer un monde virtuel (une représentation spatiale des projets urbains) que l'on peut simuler et analyser à sa guise. Elles permettent à un utilisateur de s'immerger dans le monde virtuel afin d'y vivre une expérience sensorielle semblable à la réalité. Il s'agit de la Réalité Virtuelle (RV).

Lors de la conception d'un simulateur ou d'un système de Réalité Virtuelle, il faut pouvoir évaluer dans quelle mesure le comportement de l'utilisateur en interaction avec la simulation est cohérent et inscriptible dans une situation réelle. Les systèmes de RV étant très complexes, ils font intervenir de multiples « facteurs » pouvant aider ou freiner l'expérience de l'utilisateur à l'aide du système. L'évaluation d'un système de RV correspond à évaluer la **présence** au travers de trois grands concepts que sont l'**immersion**, l'**interaction** et l'**imagination**.

Les travaux de thèse décrits dans ce manuscrit ont été réalisés autour du projet du Fond Unique Interministériel (FUI) nommé *AccesSim*. Ce projet, développé par un ensemble de partenaires¹ et financé par la région Ile-De-France vise à concevoir un outil d'aide au diagnostic d'accessibilité. L'objectif principal est de fournir un outil d'évaluation de projets urbains existants ou en conceptions par des architectes ou urbanistes. Le logiciel peut également accueillir une plateforme robotique permettant de simuler la conduite d'un fauteuil roulant. Ces deux entités combinées forment un simulateur répondant aux besoins des personnes à mobilité réduite en fournissant un système capable d'entraîner un utilisateur à la conduite de fauteuil.

¹ Arts et Métiers, CEA, CEREMH, EDF, LISV

I. Handicap et réglementation

Le handicap est une notion dont la définition a toujours posé « souci ». En effet, le terme handicap est emprunté au vocabulaire des courses de chevaux pour traduire l'égalisation des chances entre les différents concurrents en attribuant des efforts supplémentaires (poids ou longueurs) aux plus forts. Dans le domaine de la médecine, le terme de « définition » est associé à celui de « classification ». Ces deux termes peuvent avoir une connotation péjorative. Définir et classifier induit la crainte de voir transformer les problèmes quotidiens en lignes de tableaux et statistiques diverses. Le terme handicap n'apparaît que tardivement dans les années 1945, afin de remplacer les termes péjoratifs précédents tels qu'infirmes ou invalides (Chabrol, Halbert, Milh, & Mancini, 2009).

La notion de handicap et sa connotation ont évolué en parallèle des modèles qui lui sont associés. Avant la fin des années 1970, le modèle de handicap était copié sur celui du diagnostic médical. Autrement dit, le handicap était fortement associé à une maladie. En 1980, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) publie la Classification Internationale du Handicap (CIH) afin de mieux cerner et règlementer les problèmes liés au handicap (Figure 1). Ce modèle individuel dans lequel l'individu est porteur du handicap établit une relation de cause à effet entre des profils successifs allant du trouble physique ou sensoriel (origine) vers le désavantage social (manifestation) qui en découle.

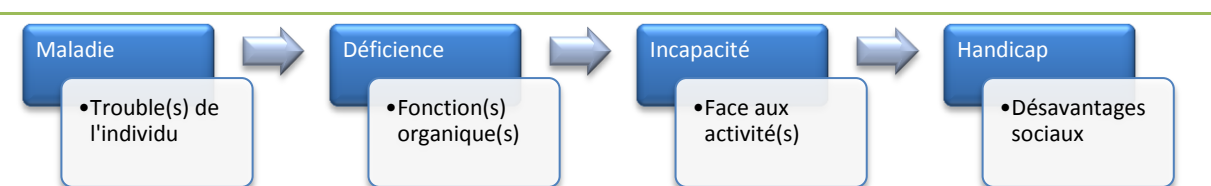


Figure 1 : Schéma conceptuel de la CIH

La différence majeure entre le modèle CIH par rapport au modèle médical est de placer le handicap dans son contexte social. La finalité de ce modèle est d'appréhender les effets sociaux (isolation, perte de confiance en soi, etc...) que peut provoquer le handicap concerné. Malheureusement, ce modèle possède l'inconvénient de présenter une relation de cause à effet dans laquelle l'individu (de par sa maladie) est seul responsable de son handicap. Ce côté statique du handicap a été controversé. Le gouvernement du Québec a établi sa propre classification du handicap (Fougeyrollas, 2002). Dans cette classification, le handicap devient une question d'interaction entre l'individu, son problème de santé et différents facteurs. Les modèles les plus récents tels que la Classification Internationale de Fonctionnement du handicap (CIF) publié par l'OMS en 2001 intègrent ce principe (Figure 2).

Cette interactivité intègre le problème individuel qui concerne le corps mais également une dimension interactive du handicap avec des aspects sociaux (Winance, 2008). Ce modèle propose ainsi un juste équilibre entre le modèle médical centré sur le soin à l'individu et le modèle social qui privilégie les solutions apportées par la collectivité.

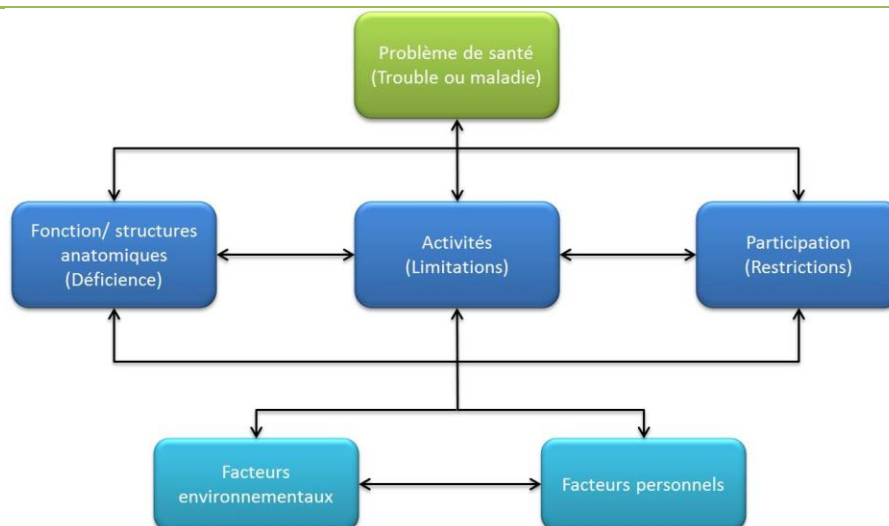


Figure 2 : Schéma conceptuel de la CIF

L'évolution des modèles de handicap fait également avancer la législation. Selon l'ONU (« ONU Enable », 2008), « Environ 10 pour cent de la population, soit 650 millions de personnes, vivent avec un handicap ». De plus, « ce chiffre est en augmentation, suite à la croissance de la population, aux avancées médicales et au processus de vieillissement ». Cette organisation a créé la Convention relative aux Droits des Personnes Handicapées. Il s'agit d'un traité en matière de droits de l'Homme adopté en 2006 précisant les catégories de personnes handicapées et la protection de leurs droits. Un grand nombre de pays a signé cette convention internationale.

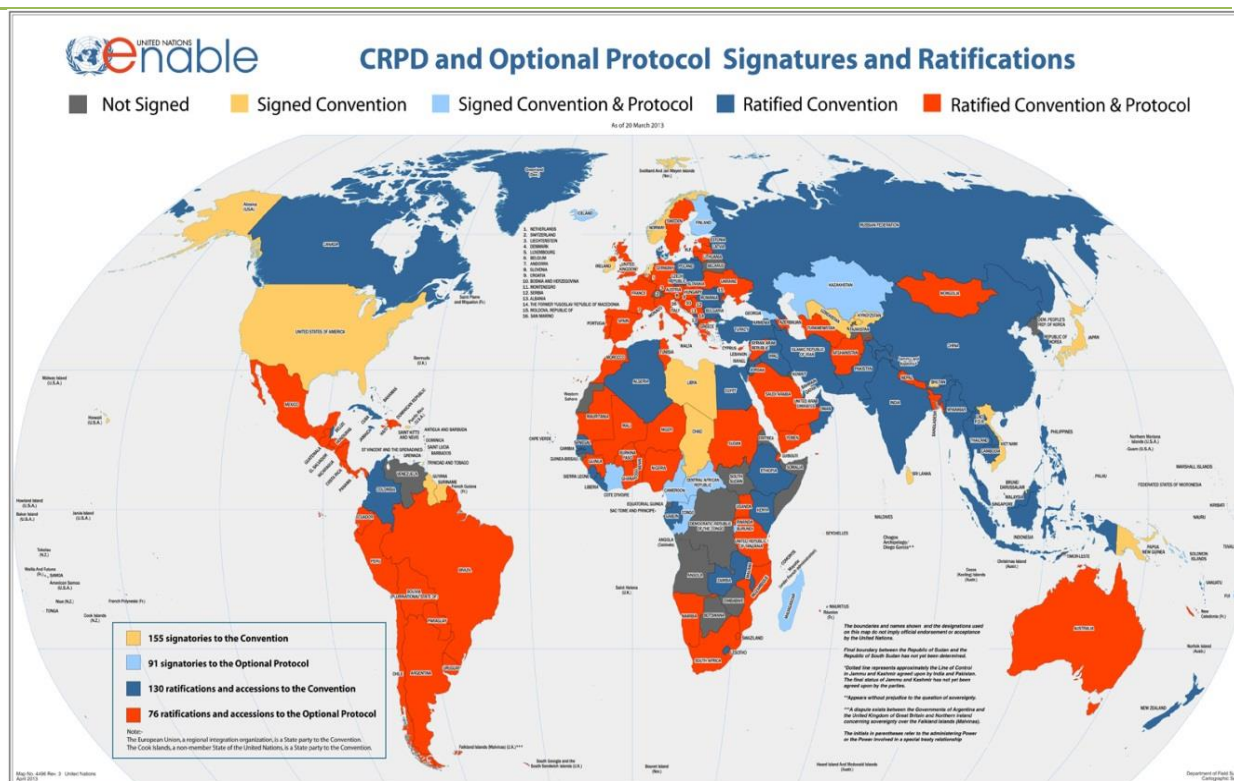


Figure 3 : Carte des pays ayant signé la Convention relative aux droits des personnes handicapées des Nations Unies

Cette convention fait suite à un certain nombre d'institution à travers le monde établissant des législations concernant l'équité des droits de ces personnes. Aux États-Unis d'Amérique, le département de la justice a promulgué en 1990, une loi nommée "Americans with Disabilities Act" (ADA) pour lutter contre les discriminations envers les personnes en situation de handicap. De manière plus globale, l'Angleterre adopte en 2010 un ensemble de lois appelées "Equality Act". Il vise à regrouper et uniformiser toutes les lois et conventions à propos des inégalités telles que l'âge, le sexe, la religion mais également les situations de handicap.

En France, la loi du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées définit le handicap comme suit : *"constitue un handicap, au sens de la présente loi, toute limitation d'activité ou restriction de participation à la vie en société subie dans son environnement par une personne en raison d'une altération substantielle, durable ou définitive d'une ou plusieurs fonctions physiques, sensorielles, mentales, cognitives ou psychiques, d'un polyhandicap ou trouble de santé invalidant"*. Cette loi va même plus loin en obligeant les Établissements Recevant du Public (ERP) ainsi que les Installations Ouvertes au Public (IOP) à se mettre aux normes françaises d'accessibilité à échéance du 01/01/2015 (« Ministère du Développement Durable », 2010).

En définitive, le développement des modèles de handicap fait émerger de nouveaux axes de réflexion concernant la mobilité des personnes. Le « handicap » est désormais le résultat d'interactions entre l'individu et son environnement. Chaque individu possédant ses propres capacités, les modifications à apporter à l'environnement pour améliorer son accès, sont tout aussi spécifiques. Il est cependant difficile de concevoir ou rénover un bâtiment public pour prendre en compte tous les cas possibles. Il faut cependant être capable d'évaluer dans quelle mesure l'environnement est accessible.

La définition de nouveaux outils est donc nécessaire pour simuler et évaluer les environnements en matière d'accessibilité et de mobilité. Ces outils doivent prendre en compte les législations et les méthodes de diagnostic d'accessibilité afin d'aider les collectivités et les architectes dans leurs démarches. En parallèle, ces outils doivent permettre de mettre en situation un individu dans un environnement (personnel ou public) pour évaluer le confort et l'utilisabilité qui lui sont associés.

La mise en situation d'un utilisateur demande que la situation simulée possède un certain degré de réalisme. Plus le réalisme est important, plus il est facile de transposer son expérience issue de situations spécifiques simulées à des conditions réelles. Pour cela, il faut que l'utilisateur puisse, sans peine, se projeter de la situation simulée à la situation réelle. Dans ce domaine, la Réalité Virtuelle offre des perspectives intéressantes. Elle permet de faire appel à l'imagination de l'individu pour l'immerger dans un monde virtuel interactif.

II. La réalité virtuelle

La Réalité Virtuelle (RV) est un domaine scientifique et technique qui regroupe des compétences diverses et variées. Les cas d'application sont légion. Il est très difficile de proposer une définition unique et unanime de ce qu'est la RV.

Il existe de nombreuses définitions de la RV dans la littérature. Elles font appel à différentes notions telles que : l'interaction, l'immersion, l'imagination et le réalisme. Parmi ces définitions, deux d'entre elles permettent d'aborder les principales notions de la RV.

La première définition est donnée par (Fuchs & Moreau, 2003) :

« La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. »

Elle met en avant le fait qu'un utilisateur est en interaction avec un monde artificiel ou « monde virtuel » plus ou moins réaliste en fonction des comportements et interfaces mis en œuvre. Dans cette définition, l'utilisateur n'est qu'un élément du système comme les autres qui perçoit son environnement et agit en conséquence. Il s'agit là d'une définition techno-centrée.

La seconde définition est donnée par (Stephen R. Ellis, 1994) :

« Les environnements virtuels sont des systèmes infographiques, interactifs et multimodaux qui créent l'illusion que leurs utilisateurs sont dans un endroit autre que celui où ils sont en réalité. »

Ici, l'utilisateur (en tant que personne) est placé au centre du système. Cette définition introduit la notion de présence selon laquelle l'utilisateur doit ressentir qu'il est présent dans le monde virtuel. Cette notion implique que le système suscite une émotion chez l'utilisateur.

Pour résumer, la première définition met en avant la mise à contribution des sens tandis que la seconde met l'accent sur l'illusion qu'apporte le monde virtuel dans lequel l'utilisateur est plongé. Suite à ces deux définitions, nous définissons la réalité virtuelle comme suit :

« La réalité virtuelle consiste à leurrer les sens d'un utilisateur afin de lui suggérer qu'il se trouve dans un monde virtuel dans lequel il peut interagir. »

En prenant les définitions données, le terme de "réalité virtuelle" est controversé car restreint à la technique employée pour immerger l'utilisateur dans le monde virtuel.

Lorsque l'on inclut l'utilisateur au centre du système, on parle moins de Réalité Virtuelle que d'Environnement Virtuel (E.V.). Un E.V. comprend la partie technique évoquée dans la RV (immersion

et interaction) en y ajoutant la compréhension de l'utilisateur du monde virtuel et son sentiment d'y être présent (son imagination).

Les E.V. peuvent représenter une donnée, un phénomène ou un contexte. Quel que soit l'objectif de virtualisation, l'utilisateur doit être capable d'appréhender et de comprendre l'environnement qui l'entoure. Pour (S. R. Ellis, 1991), un utilisateur doit pouvoir appréhender les différents éléments d'un EV :

- son "contenu" (les acteurs qui le compose),
- sa "géométrie" (la description de l'espace)
- et sa "dynamique" (les lois d'interaction mises en œuvre entre les acteurs).

Les performances d'un E.V. sont liées à la notion de **présence**. La **présence** est un état psychologique dans lequel l'utilisateur a l'illusion d'être et d'agir dans le monde virtuel « plus » que dans la réalité. La présence peut être classifiée en deux catégories (Lee, 2004) :

- La télé-présence, a été introduite par (Minsky, 1980). Il s'agit du sentiment ressenti par un opérateur lorsqu'il effectue une opération à distance (ou télé-opération). L'opérateur se projette sur la scène de l'opération effectuée par la machine. Les caméras de la machine deviennent alors comme ses propres yeux. En bref, l'opérateur se sent alors comme présent (ou télé-présent) dans cet autre lieu où il n'est pas physiquement présent.
- La présence virtuelle est un terme de (Sheridan, 1992) pour définir le sentiment de présence suscité par les EV. Il encourage ainsi à limiter l'usage de télé-présence au domaine de la télé-opération. Effectivement, l'utilisation d'un EV n'implique pas nécessairement une manipulation à distance.

Le sentiment de présence dans un E.V. tourne autour de trois notions principales désignées par l'expression : les « 3I ». Il s'agit de l'**Immersion**, l'**Interaction**, et l'**Imagination** (Bouvier, 2009).

L'**Immersion** correspond à la capacité du système à délivrer une illusion sensorielle de la réalité à l'utilisateur. L'immersion consiste à empêcher la perception du monde réel. Elle est principalement caractérisée par le nombre de sens mis en jeu ainsi que la fidélité des informations envoyées à l'utilisateur. Les interfaces considérées sont diverses et variées allant des différents écrans, de systèmes sonores jusqu'à la mise en place d'interfaces de locomotion telle que des tapis.

L'évaluation de l'immersion consiste à étudier les interfaces sensorielles offertes à l'utilisateur de manière locale (interface seule) et de manière globale (couplage des interfaces). (Hecht, Reiner, & Halevy, 2006) montrent que l'immersion augmente avec le nombre de modalités sensorielles. Les plus couramment utilisées sont la vue (Barfield, Hendrix, & Bystrom, 1999), le son (Gröhn, Lokki, & Takala, 2007) et le toucher (Gregory, Ehmann, & Lin, s. d.). Il faut cependant faire attention à leur calibration. (Hoffman, Girshick, Akeley, & Banks, 2008) montrent les problèmes de vergence oculaire rencontrés avec les nouveaux affichages 3D. De son côté, (Nishiike et al., 2013) mettent en avant les possibles problèmes de coordination entre interfaces (visuelles et vestibulaires dans son cas).

L'**Interaction** caractérise la capacité à interagir et modifier l'environnement. L'interaction est un facteur important de la présence car elle permet de différencier les simulateurs de RV et les EVs des autres médias (livres, films, etc...). L'interaction comprend de nombreuses actions telles que la navigation ou la manipulation.

Les types d'interactions peuvent prendre plusieurs formes. La plus simple des interactions est celle fournie par les Graphical User Interface (GUI). Elle consiste à utiliser des images et des mots afin de transmettre des informations. Très vite, les EVs ont utilisé le corps de l'utilisateur pour transmettre des informations de manière plus naturelle. Ainsi, les interfaces haptiques permettent de donner des informations de granularité ou de contraintes à l'aide de retour d'effort sur les membres supérieurs. L'apparition, par exemple, de la Kinect de Microsoft fait émerger de nouveaux moyens d'utiliser le corps afin d'exécuter des actions ou d'interagir avec le monde virtuel.

L'Imagination caractérise l'état psychologique et physiologique de la personne. Toutes les personnes ne sont pas sensibles à une représentation 3D des choses. Certaines personnes sont plus sensibles aux stimuli externes que d'autres. De plus, en fonction de sa fatigue ou de son moral, une personne n'éprouvera pas le même ressenti qu'une autre lors d'une même expérience au sein d'un même EV. Il faut donc pouvoir évaluer l'impact émotionnel et physiologique de l'EV sur l'utilisateur.

Cette composante d'un EV est celle qui permet de susciter des réponses émotionnelles fortes lors d'une expérience. Dans ce contexte, on peut citer (Meehan, Razzaque, Whitton, & Brooks Jr, 2003) qui étudient l'impact d'EV stressant sur le temps de réponse et le rythme cardiaque des utilisateurs. De son côté, (Giroux et al., 2013) étudient l'addiction aux jeux et l'utilisation d'EV pour contrer cette pathologie. Enfin, (Huff et al., 2011) étudient l'impact d'un EV immersif sur l'arachnophobie (la peur des araignées) et l'ophiophobie (la peur des serpents).

Le **Réalisme** est une notion que l'on retrouve couramment associée à un EV comme objectif à atteindre. La définition couramment acceptée du réalisme est liée au courant artistique consistant à représenter le monde tel qu'il est. L'évaluation du réalisme est donc fortement liée à la notion de fidélité. Des études tentent d'évaluer l'impact du réalisme en tant que fidélité dans le sentiment de présence. (Slater, Khanna, Mortensen, & Insu Yu, 2009) et (Yu, Mortensen, Khanna, Spanlang, & Slater, 2012) évaluent l'impact du rendu visuel d'un appartement virtuel en modifiant la technique d'illumination. De son côté, (Kwon, Powell, & Chalmers, 2013) évaluent le sentiment de présence durant un entretien d'embauche virtuelle en fonction du niveau de détail du recruteur virtuel. Dans les deux cas, le réalisme en matière de fidélité n'influe pas de manière importante.

La notion de présence va plus loin que la notion de réalisme car elle tente d'effacer le caractère virtuel de l'environnement afin que les objets paraissent réels et vivants. Nous définissons le réalisme comme un jugement de ressemblance entre l'expérience utilisateur et la simulation. L'utilisateur connaît le caractère virtuel de l'expérience mais juge de sa crédibilité dans le monde réel. Le réalisme correspond, dans cette acception, à la transmission d'informations sans aucun regard sur la nature de la transmission. Le point-clé, dans ce cas, n'est pas de reproduire le réel à tout prix mais de faire passer un message à l'utilisateur.

Un environnement virtuel est donc un système dans lequel on suggère à l'utilisateur qu'il est dans un monde virtuel dans lequel il puisse interagir. Les performances d'un environnement virtuel sont basées sur l'évaluation du sentiment de présence de l'utilisateur dans le monde virtuel. Ce sentiment repose sur trois facteurs. Il faut que l'utilisateur puisse interagir avec le monde virtuel afin de ne pas s'y sentir exclu. Il faut que l'utilisateur « oublie » le monde réel qui l'entoure pour s'immerger dans le monde virtuel. Il faut également que l'utilisateur comprenne de quoi le monde virtuel est composé et comment il fonctionne en faisant appel à son imagination.

III. Problématique

Dans le cadre de mes travaux de thèse, nous nous concentrerons sur l'évaluation de l'immersion et du réalisme lors de la conduite en fauteuil roulant à partir d'un simulateur. Afin que l'expérience utilisateur soit la plus efficace et la plus représentative possible, il faut s'assurer que l'immersion soit adaptée aux besoins de l'utilisateur. De plus, la simulation doit développer un niveau de réalisme suffisant pour que l'utilisateur puisse bénéficier d'une expérience qu'il puisse transposer dans la Réalité Réelle (RR).

Ce travail s'est déroulé en parallèle avec le projet FUI *AccesSim*, projet multipartenaire visant à concevoir un outil d'aide au diagnostic d'accessibilité. Le projet prévoit la conception d'une plateforme robotique permettant de transformer l'outil logiciel en simulateur de conduite en fauteuil roulant.

Dans le cadre de la conception d'un simulateur *AccesSim*, nous étudierons l'effet des différents retours sensoriels fournis par la simulation sur l'utilisateur. L'objectif de la thèse est de pouvoir préconiser et adapter la configuration du système de Réalité Virtuelle *AccesSim* en fonction de l'utilisateur et de ses contraintes.

Pour répondre à la problématique posée, ce manuscrit est divisé en 7 chapitres :

Le chapitre 2 se concentre sur un état de l'art des simulateurs de fauteuil roulants existants.

Le chapitre 3 permet d'aborder en détail les objectifs, la conception et les spécificités du projet *AccesSim* tel que développé à ce jour.

Le chapitre 4 aborde des expériences préliminaires autour du simulateur. Nous y aborderons, l'analyse de comportement du conducteur en situation réelle et virtuelle ainsi qu'une première évaluation des configurations de la plateforme.

Les chapitres 5 et 6 abordent le point central des travaux de thèse concernant l'effet des retours sensoriels et leurs impacts sur l'utilisateur. Le chapitre 6 se focalise sur les retours vestibulaires tandis que le chapitre 7 se concentre sur les retours visuels.

Le chapitre 7 conclut ce manuscrit en apportant une synthèse de nos travaux ainsi que notre contribution scientifique dans le projet.

Chapitre 2

Les simulateurs de fauteuils roulants

Que peut apporter un environnement virtuel dans les domaines liés aux fauteuils roulants ?

Dans cette section, nous nous proposons d'explorer et d'illustrer les différents objectifs d'utilisation des environnements virtuels liés aux problématiques des fauteuils roulants. Puis, nous listerons les différents composants utilisés dans la littérature.

I. Introduction

Un simulateur de fauteuil roulant est donc un environnement virtuel dans lequel l'utilisateur est placé dans la situation d'un utilisateur de fauteuil roulant. Le principe fonctionnel d'un simulateur de fauteuil roulant est le suivant (Figure 4) :

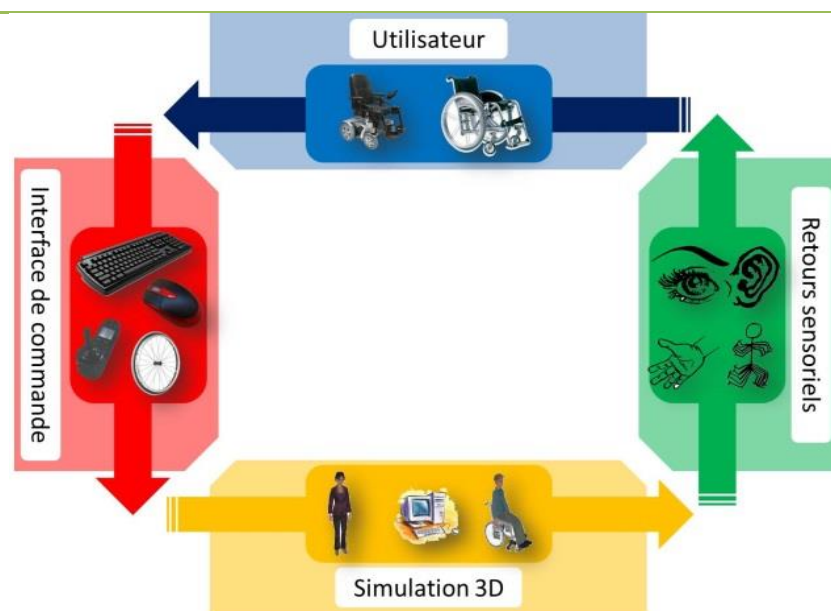


Figure 4 : Schéma fonctionnel d'un simulateur

Le principe fonctionnel est donc une boucle composée de 4 éléments :

- **L'utilisateur** est une part intégrante possédant ses propres objectifs qu'il va pouvoir atteindre à l'aide des trois autres fonctions du simulateur. L'utilisateur va agir sur les interfaces de commandes en réaction aux retours sensoriels reçus.
- **Les interfaces de commandes** sont des organes matériels permettant de traduire les actions de l'utilisateur en signaux compréhensibles par la simulation 3D.
- **La simulation 3D** est l'outil logiciel avec lequel dialogue l'utilisateur. La simulation 3D intègre les différents modèles qui constituent la logique du monde virtuel. Elle possède ses propres objectifs qui vont permettre de répondre à ceux de l'utilisateur.
- **Les retours sensoriels** sont des organes matériels permettant de traduire les signaux de la simulation 3D en informations sensorielles compréhensibles par l'utilisateur.

Lors de l'utilisation d'un tel simulateur, l'utilisateur agit sur la simulation 3D à l'aide de différentes interfaces de commande (choisies selon les besoins). Ces dernières peuvent être communes telles qu'une souris, un clavier ou plus spécifiques comme par exemple un joystick ou directement la main courante du fauteuil. La simulation 3D exécute les actions issues des commandes pour mettre à jour le monde virtuel et l'avatar de l'utilisateur. L'état de l'avatar va permettre de calculer les retours sensoriels nécessaires au simulateur. De façon classique, les retours sensoriels concernent la vue et l'ouïe (à l'instar des jeux vidéo). Il existe d'autres types de retours sensoriels faisant intervenir le toucher (pour gérer l'effort sur la main courante grâce aux systèmes haptiques ou à retour d'effort) ou le système kinesthésique (pour provoquer des sensations de mouvement à l'aide de systèmes de

mouvements). C'est alors à l'utilisateur d'interpréter ces retours afin d'adapter les prochaines commandes.

Ce modèle fonctionnel d'un simulateur de fauteuil roulant permet de définir deux principales caractéristiques d'un simulateur. En effet, le couple Utilisateur/Simulation3D permet de définir les applications à un simulateur tandis que le couple Interface de Commande/Retours Sensoriels permet de décrire la configuration du simulateur utilisée et donc ses performances.

Les applications d'un simulateur sont possibles dès lors qu'il y a adéquation entre les objectifs de l'utilisateur et les objectifs du système. Prenons l'exemple d'un utilisateur voulant améliorer ses performances de conduite comme le temps de parcours. Pour répondre à cet objectif, il a besoin de s'entraîner. Il ne peut donc utiliser un simulateur que si les objectifs de ce dernier intègrent les notions de mise en situation de conduite sur parcours et de mesures de performance telle que le temps de parcours. Dans cet exemple, l'entraînement ne peut être une application du simulateur que si les objectifs du système sont en adéquation avec les objectifs de l'utilisateur.

Le degré d'interaction (la commande) et d'immersion (les retours) offert par le simulateur permet d'évaluer deux des composantes de la présence. A l'aide de la description de ces deux blocs, nous pouvons donc évaluer les performances d'un simulateur. Dans notre précédent exemple, l'expérience n'est pas la même selon que l'utilisateur manipule un joystick ou les roues actives du fauteuil. De la même manière, activer les roues actives sans retour de force et sans mouvement diminue l'immersion de la simulation.

Afin de définir le mieux possible les simulateurs de fauteuil roulant, il nous faut donc aborder leurs applications. Autrement dit quels sont les objectifs utilisateurs et les objectifs de tels systèmes. Puis nous devons explorer l'interaction et l'immersion des simulateurs au travers de leurs organes de commande et des retours sensoriels disponibles.

II. Recherche et applications

Les applications de la Réalité Virtuelle sont le fruit de l'adéquation entre les objectifs de la simulation 3D et ceux de l'utilisateur. Autrement dit, les objectifs du simulateur doivent être confrontés aux objectifs finaux afin de décrire les applications.

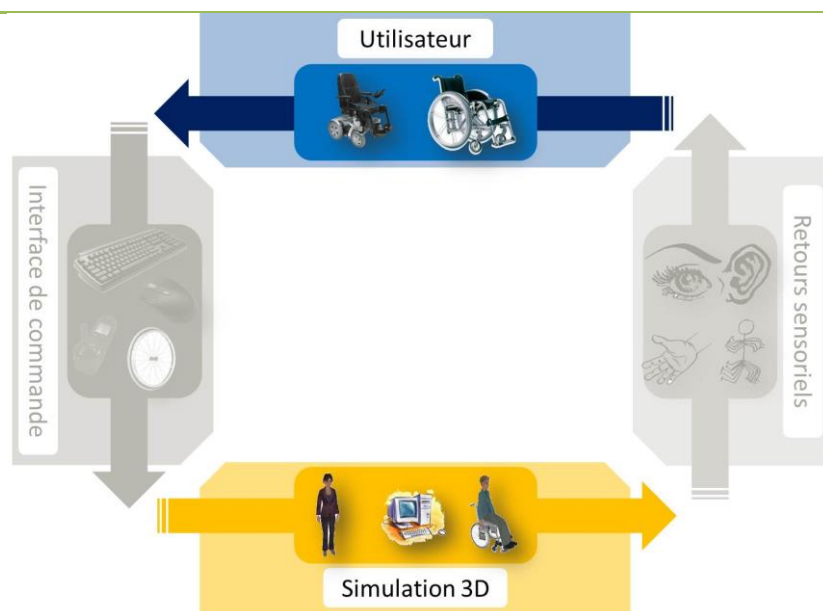


Figure 5 : Schéma fonctionnel d'un simulateur avec focus sur les objectifs

L'objectif principal d'un simulateur est de mettre l'utilisateur en situation de conduite écologique dans un environnement ayant des caractères spécifiques (plus ou moins accessible, plus ou moins réaliste, etc...). Les situations à simuler sont virtuellement illimitées. En plaçant sur le système des capteurs pour recueillir des données, nous pouvons évaluer les performances de l'utilisateur lors de l'exécution d'une tâche particulière à l'aide des données. En utilisant les principes de la réalité virtuelle, nous pouvons faire en sorte que l'utilisateur oublie le système réel pour se focaliser sur le monde virtuel. Le système de capteurs pour le recueil de données devient et doit être non invasif et non intrusif.

La mise en situation sert à évaluer les performances d'un utilisateur dans une situation spécifique et connue. Les performances étudiées peuvent être motrices. Dans le domaine du vélo, (Song, Kim, & Kim, 2004) se servent d'un environnement virtuel pour étudier l'équilibre postural sur un vélo. De même, (Ranky et al., 2010) proposent un simulateur de vélo avec retour d'effort sans visualisation afin d'étudier les réactions physiologiques développées lors de l'effort cycliste. Les performances peuvent être issues de données d'ordre cognitif. (Cameirão, Badia, Oller, & Verschure, 2010) utilisent la RV afin d'étudier l'utilisation des membres supérieurs de personnes ayant subi un AVC² à l'aide d'un jeu de rattrapage de balle. (Ann-Helen Patomella, Kerstin Tham, & Anders Kottorp, 2006) analysent l'habileté de la conduite en voiture pour personne ayant subi un AVC. De même, (Okahashi et al., 2013) testent les fonctions cognitives de patients à l'aide d'un shopping virtuel. Dans les deux

² Accident Vasculaire Cérébrale : il s'agit d'un arrêt brutal de la circulation sanguine au niveau du cerveau entraînant des lésions plus ou moins sévères.

cas (performances motrices et cognitives), l'objectif est que l'utilisateur atteigne une performance optimale synonyme de comportement adéquat face à la situation.

Les utilisateurs finaux et les tâches à considérer sont très divers comme le montrent (Holden, 2005) et (Adamovich, Fluet, Tunik, & Merians, 2009). Dans le cadre de la conduite en fauteuil roulant, il peut s'agir d'architectes, d'ingénieurs, d'une personne lambda, etc... Dans tous les cas, chacun d'eux a son propre objectif. Ces objectifs utilisateurs vont permettre de définir des applications au simulateur. Si on reprend les exemples précédents, nous pouvons imaginer qu'un sportif puisse améliorer son endurance à vélo à l'aide d'un simulateur (Ranky et al., 2010). De même, ce n'est que parce que le simulateur évalue l'utilisation des membres supérieurs (Cameirão et al., 2010) qu'une personne peut améliorer le contrôle de ses membres. Les applications d'un EV sont la mise en adéquation des objectifs de la simulation et des objectifs de l'utilisateur.

En se focalisant sur les simulateurs de fauteuil roulant à l'instar de (Pithon, Weiss, Richir, & Klinger, 2009), nous avons discerné trois grandes applications qui sont la préconisation matérielle, l'évaluation et l'entraînement.

1. Préconisation de matériel

La première application de recherche utilisant les environnements virtuels concerne la préconisation de matériel. Il s'agit de simuler un composant matériel ou logiciel d'un fauteuil dans l'environnement virtuel afin de tester son utilité. On peut, par exemple, proposer une technologie d'assistance, évaluer un aménagement sur une technologie d'assistance ou alors, paramétrer une technologie d'assistance en fonction de l'utilisateur. Pour cela, on peut utiliser un EV pour simuler le système dans son environnement ou bien une partie seulement.

L'EV peut être couplé à un système réel pour réaliser des calculs complexes à partir de données réelles. Par exemple, (Braga, Malheiro, & Reis, 2010) se servent d'une reconstruction 3D afin de tester et de valider de nouveaux algorithmes de commande à implémenter sur un fauteuil réel équipé de capteurs (Figure 6). L'environnement virtuel récupère les données réelles issues du fauteuil, les traite dans le monde virtuel pour enfin évaluer la réponse adéquate au problème du déplacement. Dans ce cas, l'EV devient un moyen de contrôler l'interaction d'un fauteuil intelligent avec son environnement. (Iturrate, Antelis, Kubler, & Minguez, 2009) utilisent une interface cerveau-machine pour permettre à l'utilisateur d'aider à la décision d'un fauteuil intelligent. L'environnement virtuel est une reconstruction de l'environnement proche (simulé par laser-scanner) projeté sur un écran avec des instructions additionnelles. Le regard de l'utilisateur permet d'orienter les décisions du fauteuil.

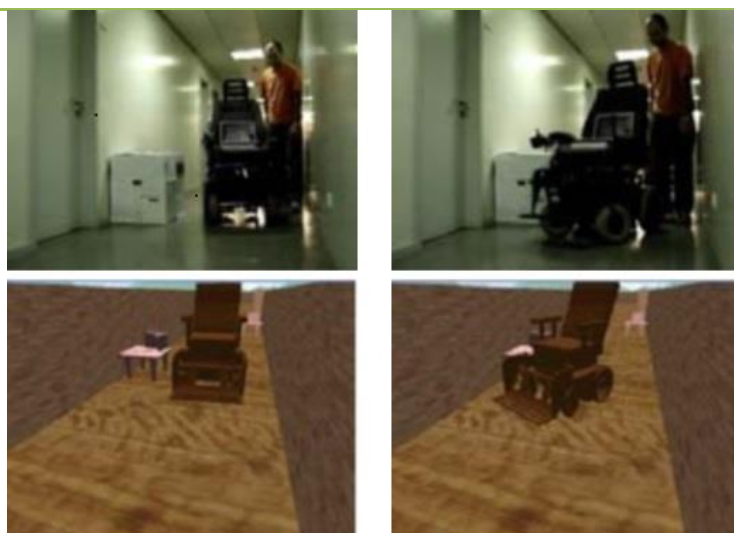


Figure 6 : Validation de commande de fauteuil roulant par simulation 3D

Dans ces premiers exemples, l'EV permet au système de réaliser une représentation de l'environnement qui l'entoure à l'aide de données réelles. L'immersion et l'imagination ne sont pas les notions mises en avant. L'EV est principalement évalué sur l'interaction offerte avec l'utilisateur. L'objectif de l'utilisateur est d'être aidé dans sa navigation. Pour cela, des solutions sont évaluées grâce à un EV en fonction de données réelles.

L'EV peut simuler le comportement du système complet dans son environnement. L'EV va donc réagir en fonction du système simulé. Il peut s'agir d'un fauteuil lui-même : (Niniss & Nadif, 2000) intègrent le comportement d'un fauteuil roulant intelligent dans un EV. Cela permet de tester et valider différents modes de navigation plus ou moins automatiques avant de procéder à des tests réels. Le système simulé peut être l'interface de commande. Auquel cas, on se focalise moins sur le modèle du fauteuil virtuel que sur la performance de la commande. Par exemple, (Firoozabadi, Oskoei, & Hu, 2008) et (Grychtol, Lakany, & Conway, 2009) se servent d'interfaces homme-machine afin de contrôler un fauteuil roulant virtuel par un simple PC. La commande est testée dans un environnement sécurisé entièrement virtuel. De plus, (Spaeth et al., 2008) et (Mahajan et al., 2011) comparent les trajectoires effectuées avec deux types de joystick. Les tests sont réalisés avec une vue de dessus 2D. Les utilisateurs sont atteints de troubles cérébraux. Cela permet d'évaluer le type de joystick le plus efficace.

Dans les cas présentés, l'objectif utilisateur consiste à tester et préconiser le comportement automatique du système afin d'éviter les comportements dangereux en situation réelle dus à des cas imprévus dans la conception. Si le système concerne un processus autonome tel que la navigation, l'EV virtuel doit préalablement valider sa représentation de l'environnement afin que les stimuli soient les plus cohérents possibles. Le modèle doit donc posséder un fort degré de réalisme physique. Si le système à étudier est une interface de commande, alors l'EV ne possède pas de fortes contraintes. L'EV ne devient qu'un contexte d'utilisation de l'interface. Il n'est pas le sujet d'études à proprement parlé mais un moyen facilitant la récolte des données avec les limites associées.

La préconisation matérielle est l'une des applications intervenant principalement dans le cadre de la conception de fauteuil roulant intelligent ou de nouvelles interfaces de commande. L'EV ne sert pas uniquement à évaluer l'utilisateur, il sert à éprouver les capacités d'un système. Il n'est alors qu'un moyen de récolter les données. L'utilisateur n'est que l'observateur de deux systèmes en communication. Il analyse les données reçues mais n'est plus un rouage du système. Dans ce cas, le sentiment de présence est « faible » pour ce type d'application. Les simulateurs ayant pour application la préconisation matérielle sont évalués sur l'interaction et le réalisme.

2. Evaluation de l'environnement et/ou de l'individu

La deuxième application de recherche concerne l'évaluation. Les simulateurs de fauteuil roulant vont permettre de mesurer, quantifier une situation, un environnement ou le comportement d'un individu selon des critères définis. L'objectif utilisateur consiste à se servir des résultats de l'évaluation afin d'améliorer des performances (vitesse, collisions, etc.) ou des critères (confort, accessibilité, etc.). L'évaluation concerne trois sujets : l'environnement, l'individu et l'EV lui-même.

L'évaluation de l'environnement consiste à déplacer un fauteuil roulant virtuel de manière autonome entre un point de départ et un point d'arrivée. Ce type de simulation nécessite un modèle de fauteuil et un calculateur de trajectoire. Typiquement, (Han, Kunz, & Law, 2002) ont créé une simulation en ligne permettant d'analyser la conformité d'un environnement donné en Computer-Aided Design (CAD) (Figure 7). L'idée principale est de comparer les chemins pris par une personne en fauteuil et une personne valide pour accéder à un lieu ou une position. Il permet de remplir et rédiger un document de conformité de l'environnement en fonction des trajectoires demandées par l'expert. De la même manière, (Moschonas, Tsakiris, & Tzovaras, 2013) évaluent un environnement à l'aide de cheminements mais en y ajoutant des contraintes dynamiques (couples, forces, etc...) pour la propulsion du fauteuil (Figure 8). Ainsi, les capacités d'un Utilisateur de Fauteuil Roulant (UFR) peuvent être simulées et testées dans des environnements issus de « Computer-Aided Design » (CAD). De son côté, (C. S. Harrison, Grant, & Conway, 2010) récupèrent des données concernant la trajectoire et le rythme cardiaque lors de déplacements sur un simulateur avec retour d'effort sur les roues actives du fauteuil. Ils calculent ainsi la dépense énergétique du déplacement et attribuent une note à l'environnement 3D considéré.

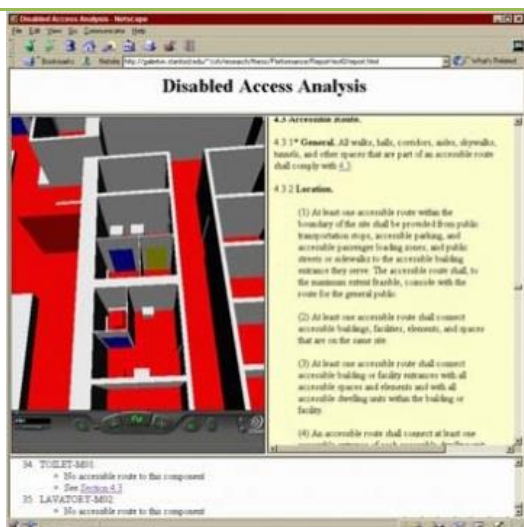


Figure 7 : Analyse de non-conformité d'un environnement CAD



Figure 8 : Analyse dynamique d'un environnement CAD

L'évaluation de l'environnement souffre de quelques limitations. Lorsqu'ils sont autonomes, les algorithmes actuels tels que ceux présentés précédemment sont basés non sur un individu unique mais sur une classe d'individus. Cette dernière correspond à une utilisation de fauteuil standard pour une utilisation standard. Les fauteuils roulants plus spécifiques (adaptés à l'individu) sont peu représentés dans de telles analyses. De plus, les algorithmes de recherche de chemin sont basés sur des algorithmes issus du domaine du jeu vidéo. Ils ne prennent pas en compte les comportements de conduite d'un UFR mais associent l'utilisateur à son fauteuil.

L'évaluation de l'individu par un EV permet d'évaluer et d'améliorer le comportement, notamment la motivation, face à un entraînement à la conduite en fauteuil roulant. Par exemple, (O'Connor et al., 2000), (O'Connor, Fitzgerald, Cooper, Thorman, & Boninger, 2001) et (O'Connor, Fitzgerald, Cooper, Thorman, & Boninger, 2002) étudient l'effort fourni lors d'entraînements à la propulsion au fauteuil à l'aide de mini jeu. Ils mesurent l'effet des exercices à partir de données physiologiques (fréquence cardiaque et volume respiratoire). Ils montrent que l'utilisation de jeux induit une dépense d'énergie plus grande chez les sujets. Ils arrivent à leur capacité d'entraînement plus vite et la maintiennent plus longtemps. De plus, la volonté de pratiquer un effort peut être encouragée ou améliorée par l'utilisation de mini jeu. (Niniss & Inoue, 2006) analysent les différences de comportement entre Personne à Mobilité Réduite (PMR) et personne valide dans un EV pour évaluer l'expertise d'une personne à la conduite de fauteuil roulant. De même, (A. Gacem, Nadjar-Gauthier, Monacelli, Al-ani, & Oussar, 2012) classifient les utilisateurs de fauteuil roulant en classe de conduite à l'aide de données issues du joystick. Ces deux études permettent ainsi de préconiser le fauteuil roulant adapté au comportement de l'utilisateur et le niveau d'habileté. Enfin (Y. Morere, M.A. Hadj Abdelkader, S.M. Meliani, & G. Bourhis, 2011) évaluent les capacités de conduite d'un utilisateur dans un EV grâce à l'analyse de trajectoire.

L'évaluation d'un EV proprement dit, passe par la comparaison de comportement en situation réelle et virtuelle ou bien par les préférences utilisateurs en ce qui concerne la présence. Dans ce cas, nous recherchons à évaluer la capacité du simulateur à engendrer des comportements cohérents face à la situation simulée ou bien la configuration la plus adéquate aux objectifs fixés. (Cooper et al., 2002) comparent l'utilisation de deux types de joystick à l'aide de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) sur les commandes des deux joysticks. Pour chaque type de joystick, ils effectuent des tests en situation réelle puis en situation virtuelle avec une configuration de type bureau (un simple ordinateur équipé d'un joystick). Les résultats ne montrent pas de différence significative concernant l'utilisation des deux joysticks.

De même, (Archambault, Tremblay, Cachecho, Routhier, & Boissy, 2012) étudient la différence de comportement entre réel et virtuel. Les indicateurs sont les actions utilisateurs sur un joystick, le temps de réalisation de la tâche ainsi que le sentiment de présence. Comme dans l'exemple précédent, l'étude montre une corrélation entre conduite en situation réelle et conduite en situation virtuelle pour des tâches de conduite simples. Cependant, plus la tâche se complexifie, plus la corrélation diminue. Une configuration minimale n'est donc pas suffisante pour simuler la conduite d'un fauteuil roulant.

(Alshaer, Hoermann, & Regenbrecht, 2013) testent les performances « utilisateur » en fonction du champ de vision utilisateur. Il teste des configurations ayant pour projection : écran normal (champ

de vision étroit), stéréoscopie (champ de vision étroit), et trois écrans horizontaux (champ de vision large). Les trajectoires sont réalisées à l'aide d'un joystick. Un score est calculé à partir de données sur la trajectoire et d'un questionnaire sur la présence. Les trajectoires et préférences utilisateurs montrent que la configuration la plus efficace est celle composée des trois écrans horizontaux. Pour la conduite en fauteuil roulant électrique, il est donc préférable d'avoir un large champ de vision. La stéréoscopie n'est pas avantageuse.

Les EV « simplifient » les méthodes d'évaluation car ils fournissent des situations répétables et paramétrables permettant des évaluations dans de nombreux domaines. Un simulateur de fauteuil roulant permet d'effectuer des évaluations par le déplacement du fauteuil dans le monde virtuel. Nous pouvons ainsi caractériser l'environnement simulé, les capacités de l'individu ou bien les performances du système lui-même.

3. Entraînement

La dernière thématique de recherche exploitant les environnements virtuels est l'entraînement de l'utilisateur. L'évaluation est une caractérisation des performances d'un objet à un moment donné. L'entraînement, quant à lui, dénote une évolution. L'objectif est d'améliorer les performances dudit objet au cours du temps à l'aide d'un processus itératif.

Un simulateur de fauteuil roulant permet d'enseigner à l'utilisateur des compétences à appliquer en situation réelle à l'aide de l'EV. L'entraînement d'une personne à l'aide d'un EV demande que ces compétences acquises en virtuel soient reproductibles en réel. Les méthodes d'évaluation précédentes sont utilisées afin de valider la transposition de connaissances. A partir de là, un processus itératif adapte l'EV en fonction des capacités de l'utilisateur au cours du temps.

Dans cette optique, (A. Harrison, Derwent, Enticknap, Rose, & Attree, 2000) et (A. Harrison, Derwent, Enticknap, Rose, & Attree, 2002) testent les différences de performances en termes de manœuvrabilité et de recherche de chemin entre situation réelle et virtuelle. Le simulateur est composé d'un simple écran de 17 pouces munis d'un joystick. L'étude démontre la nécessité d'avoir un modèle physique de fauteuil réaliste afin de simuler au plus juste la manœuvrabilité du fauteuil. Le même constat est adopté par (Archambault, Chong, Sorrento, Routhier, & Boissy, 2011) et (Archambault et al., 2013). Ils limitent l'entraînement à des cas simples afin que la corrélation entre situation réelle et virtuelle soit suffisante. Ainsi, (Morère, Bourhis, Guilmois, Taverne, & Coulombel, 2012) évalue les capacités de contrôle d'un fauteuil roulant électrique en analysant la trajectoire réalisée sur un parcours virtuel spécifique. L'entraînement peut être adapté en fonction de l'utilisateur et de palier de compétences. (Inman, Loge, Cram, & Peterson, 2011) étudient l'évolution de performances réelles à l'aide de scénarios réalisés sur simulateur, comprenant un HMD³ et des rouleaux à retour d'effort. Chaque scénario a sa propre difficulté ; il correspond un parcours plus ou moins contraint. Ses scénarios virtuels ont permis à des enfants d'apprendre et d'assimiler des compétences fonctionnelles réelles.

L'un des avantages à utiliser un EV pour de l'entraînement, est de pouvoir adapter le système en fonction de l'utilisateur et de ses capacités. Le simulateur de (Desbonnet, Cox, & Rahman, 1998)

³ HMD : Head Mounted Display que l'on traduit par casque de réalité virtuelle en français.

propose des scénarios simples et modifiables d'entraînement en fauteuil roulant électrique. Le fauteuil virtuel est directement piloté par le joystick réel de l'utilisateur. (Adelola, Cox, & Rahman, 2002) donne des éléments de jeu permettant de motiver l'utilisateur durant son entraînement. Le simulateur est composé d'un moniteur simple couplé à un système à retour d'effort. Le simulateur adapte la résistance au mouvement du fauteuil en fonction de la pathologie du patient.

L'entraînement est l'application comportant le plus de contraintes concernant l'EV. Nous sommes globalement limités dans le choix des compétences à entraîner à cause des technologies actuelles. Aucune solution technologique ne remplace, pour l'instant, l'entraînement sur le terrain. Malgré cela, un EV permet de répéter à volonté les situations à risques, de les illustrer et de les adapter. La conduite de fauteuil roulant manuel est une activité qui fait appel à la vue, l'ouïe, l'équilibre et le toucher. Il est, à ce jour, difficile de simuler l'intégralité des retours sensoriels mis en œuvre lors de la conduite en un seul simulateur. La configuration des EV détermine le niveau d'interaction renvoyée à l'utilisateur. Selon qu'il doit agir par l'intermédiaire d'un formulaire ou par lui-même au travers de ces sens, la complexité d'un environnement virtuel est modifiée en conséquence.

III. Interface de commande et retours sensoriels

Dans la section précédente, nous avons parcouru les principales thématiques de recherche liées aux simulateurs de fauteuil roulant. Les objectifs et les utilisateurs finaux sont nombreux. Cette diversité se retrouve également dans les choix de conception de la plateforme robotique proprement dite.

Dans cette section, nous parcourons les différentes solutions technologiques et ressources robotiques rencontrées dans les simulateurs présents dans la littérature afin de décrire l'interaction et l'immersion éventuellement disponibles dans un simulateur de fauteuil roulant.

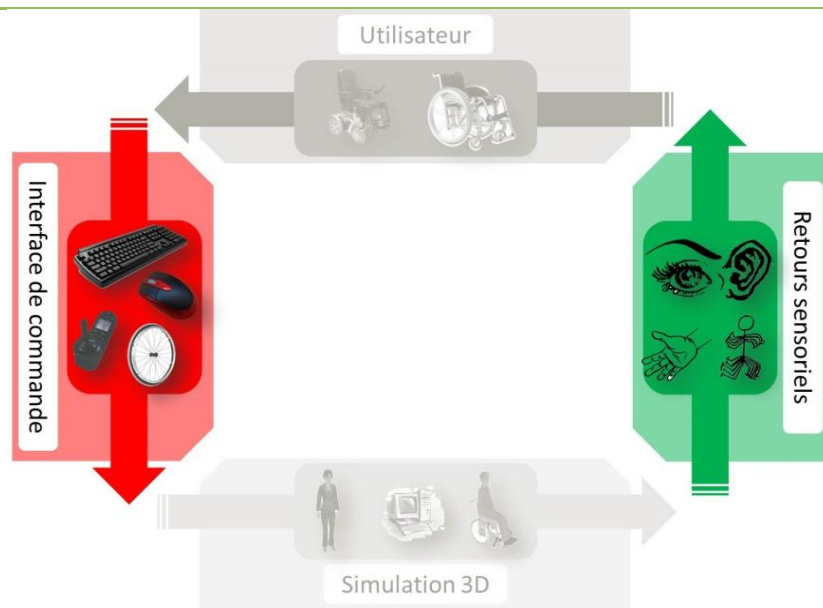


Figure 9 : Schéma fonctionnel d'un simulateur avec focus sur l'interaction et l'immersion

1. Les organes de commandes

Une interface de commande est en réalité une interface Homme-Machine. Il s'agit d'une interface de communication directe (via un dispositif non-invasif) entre un usager et un dispositif externe (un ordinateur dans la plupart des cas). Outre le clavier et la souris, présents sur tous les ordinateurs, il existe deux principaux types d'organe de commande.

Joystick

Dans le cas de la conduite en fauteuil roulant, l'utilisateur pilote souvent le fauteuil virtuel à l'aide d'un joystick. Le joystick permet de mieux reproduire la tâche de conduite en fauteuil produisant les mêmes actions pour piloter le fauteuil qu'en réel.

Le joystick utilisé peut être commercial (Figure 10). (Palmon, Oxman, Shahar, & Weiss, 2004) ont créé un simulateur de réalité virtuelle permettant de circuler dans des environnements à l'aide d'un joystick commercial à retour d'efforts. Dans ce cas précis, le retour d'effort permet de générer des vibrations en cas de choc avec l'environnement.



Figure 10 : Exemple de joystick de jeu



Figure 11 : Exemple de joystick de fauteuil roulant électrique

Malgré l'apport de retour d'effort et de facilité d'intégration, certaines études préféreront utiliser un joystick de fauteuil roulant réel (Figure 11). Ils ont une forme et un contrôle commande adaptés à la conduite en fauteuil roulant. De plus, ils peuvent être adaptés à l'utilisateur. De manière simple, (Desbonnet et al., 1998) utilisent un joystick couplé à une simulation 3D affichée sur un ordinateur. La simulation propose des scénarios d'entraînement en fauteuil roulant électrique pour les enfants. La simulation utilise le joystick réel de l'utilisateur via une communication par un bus de données dédié. (A. Harrison et al., 2000) testent les différences de performances en manœuvrabilité et en recherche de chemin entre situation réelle et virtuelle en utilisant un joystick.

Il existe différents types de joystick que l'on peut aisément tester en simulation : les joysticks conventionnels et les joysticks isométriques⁴. (Cooper et al., 2002) comparent les performances d'utilisation de ces deux types de joystick entre réel et virtuel pour évaluer le joystick le plus efficace lors d'essais sur un simulateur. (Mahajan et al., 2011) quant à eux étudient une trajectoire réalisée en 3D à l'aide de ces joysticks afin d'évaluer la fatigue et la surcharge cérébrale causées par l'utilisation du simulateur.

Les joysticks peuvent également servir d'entrée pour l'évaluation de comportement en simulation (Archambault et al., 2011). La classification des individus à partir du calcul d'indicateurs de performances regroupe les individus selon des classes de comportement. Ces indicateurs de performances peuvent être extraits suite à l'analyse des actions de l'utilisateur sur le joystick pendant une phase de conduite. Les phases de conduite peuvent être simulées à l'aide d'un EV. Ce dernier permet alors de procéder à des extractions de données dans des conditions reproductibles et entièrement contrôlées.

Le joystick est l'interface de commande la plus répandue pour piloter des fauteuils roulants dans des EV. Quoique seuls les fauteuils roulants électriques utilisent un joystick, il reste l'organe de commande le plus intuitif et le moins coûteux. Il n'est cependant pas suffisant pour l'apprentissage de conduite en fauteuil roulant manuel.

⁴ Un joystick isométrique est un joystick pour lequel l'entrée dépend de la force exercée plutôt que de la position.

Interface Cerveau-Machine

Une Interface Cerveau-Machine ou Brain Computer Interface (BCI) est une interface de communication entre un cerveau et un ordinateur (Figure 12).



Figure 12 : Interface Cerveau Machine (BCI) pour la 3D

A l'aide d'un casque muni d'électrodes placées sur le crâne, il est possible d'acquérir les signaux cérébraux passants à travers la boîte crânienne (appelés signaux EEG). L'ordre de grandeur de ces signaux électriques ne dépasse pas le microvolt et les signaux acquis sont très fortement bruités. Une interface similaire peut être utilisée pour analyser l'état de muscles faciaux par Electromyographie⁵. L'étude de ces signaux permet de traduire les volontés de l'utilisateur par l'intermédiaire de l'activité musculaire ou cérébrale en actions spécifiques dans l'environnement virtuel.

Les Interfaces Cerveau-Machine sont utilisées pour le contrôle d'un fauteuil roulant pour des personnes ne possédant pas de contrôle de leurs membres supérieurs tels que les personnes atteintes de myopathie, les empêchant d'utiliser un joystick ou la main courante. (Firoozabadi et al., 2008) et plus récemment (Silva, Morere, Naves, de Sa, & Soares, 2013) se servent d'Electromyographie (l'activité des muscles faciaux) pour réaliser leur commande tandis que (Grychtol et al., 2009) se sert de signaux EEG. La complexité des traitements de signaux limite ces interfaces à l'activation des commandes simples de type : tourner à gauche/droite, avancer/reculer et s'arrêter.

Il est également possible de fusionner les interfaces pour créer des interfaces hybrides. (Kalunga, Chevallier, Rabreau, & Monacelli, 2014) fusionnent la BCI et une interface de contrôle 3D sans contact afin de piloter des objets mobiles en simulation. L'interface de contrôle 3D permet de piloter l'objet de manière standard (par translation et rotation) tandis que la BCI sert à activer des réponses préprogrammées (dans le cas présent se diriger vers un point précis nommé raccourci). Ils démontrent que la combinaison des deux interfaces diminue le temps et la distance de parcours.

L'étude de signaux BCI peut engendrer des commandes non désirées et donc des réactions imprévues voire dangereuses en cas de test réel. L'utilisation de simulateurs de fauteuils roulants permet de tester et valider le comportement de fauteuils roulants réel.

⁵ L'électromyographie est l'étude et la compréhension des signaux électriques musculaires. Cela permet, entre autre chose, d'étudier la qualité de la contraction musculaire chez un patient.

2. Retours sensoriels

Retours visuels

Les retours visuels sont assurés par le système de projection utilisé. La vue est le sens le plus suscité chez l'homme. Il est donc un facteur important d'immersion et donc de la présence. Les systèmes de projection communément utilisés influencent le champ de vision de l'utilisateur et donc a fortiori, la quantité d'informations que la simulation va diffuser ainsi que la distorsion possible de l'image.

Lors de tâches de navigation, il faut pouvoir estimer sa position par rapport à l'environnement et aux obstacles. Lors de la conduite en fauteuil roulant, ce n'est plus sa propre position mais celle du fauteuil qu'il faut estimer. Or cela n'est pas forcément intuitif sans avoir un retour visuel. Les systèmes de visualisation sont variés et dépendent de certains critères. Le premier système de visualisation est un simple écran d'ordinateur. Il représente le système de visualisation minimal. Il demande à l'utilisateur d'imaginer la position du fauteuil comprenant les roues avant et arrière dans l'environnement car une caméra fixe ne suffit pas. L'immersion peut être augmentée en augmentant la surface de projection et le champ de vision.

Il existe différents moyens d'augmenter la surface de projection. Le premier est d'utiliser un seul écran plus large. L'inconvénient est que la résolution spatiale du pixel augmente d'autant. La qualité de l'image est donc détériorée. Pour éviter cela, l'alternative est d'ajouter des écrans ayant des caractéristiques similaires. Pour comparer ces différentes alternatives, (Alshaer et al., 2013) teste un écran normal avec un champ de vision restreint, le même écran mais avec de la stéréoscopie et un écran large champ (Figure 13). La première conclusion est que la stéréoscopie influe peu sur l'immersion et la qualité de conduite. La seconde conclusion est que les sujets de cette étude ont préféré naviguer avec un écran large même si des problèmes de raccord entre les écrans ont été notés. Dans la même finalité, (Grychtol et al., 2009) se servent d'un écran sphérique (Figure 14) afin d'avoir le plus de champ de vision possible. Ils limitent la distorsion de l'écran à la performance de la correction de l'écran.



Figure 13 : Exemple de multi-projection



Figure 14 : Exemple de projection sphérique

La solution « techniquement idéale » est celle adoptée par (Inman et al., 2011). Ils ont choisit d'utiliser un HMD⁶ couplé à une centrale inertielle. Avec cette interface, l'orientation de la caméra est pilotée par l'orientation de la tête de l'utilisateur. Le champ de vision de l'utilisateur est donc

⁶ Head-mounted display ou casque de réalité virtuelle.

virtuellement de 360° dans les deux axes. L'écran est physiquement placé près des yeux et il traduit un mouvement. Le temps de latence et l'accommodation des yeux induisent ce que l'on appelle le « mal du simulateur ». C'est un ensemble de problèmes physiques liés à l'utilisation de simulateur. Cela inclut des dysfonctionnements visuels (fatigue oculaire et vision floue principalement), mentaux (difficulté à se concentrer, confusion, apathie, etc...) et physique (maux de tête, nausées, etc...).

Retours haptiques – main courante

Un système à retour d'effort est un système robotique qui permet à l'utilisateur de ressentir des forces. Les systèmes les plus connus en RV sont les bras à retour d'effort; ces bras robotiques capables de générer une force opposée au mouvement de l'utilisateur pour simuler des collisions ou des contacts.

Dans le cadre de la conduite en fauteuil roulant, on utilise un système de rouleaux à retour d'effort. Il s'agit d'un cylindre couplé à un moteur avec laquelle la roue active du fauteuil est en contact. Un encodeur optique est placé sur l'axe moteur permettant de contrôler le mouvement de ce dernier. Le système à rouleaux possède deux états de fonctionnement :

- Un état passif dans lequel on se sert uniquement de l'encodeur optique ;
- Un état actif dans lequel le moteur est actionné.

Avec une utilisation passive, l'objectif des rouleaux est de récupérer la vitesse exacte de chaque roue du fauteuil (personnel) de l'utilisateur afin de simuler le comportement du fauteuil au plus proche de la réalité. (Adelola et al., 2002) ont développé un simulateur permettant d'entraîner les personnes à l'utilisation de fauteuil roulant mais uniquement électrique. Ce n'est pas l'utilisation la plus intéressante des rouleaux car ce système ne produit pas de retour d'effort.

Avec une utilisation active, les rouleaux à retour d'effort sont principalement destinés à la simulation de fauteuil roulant manuel. L'utilisateur pilotant le fauteuil directement à partir des roues, le retour d'effort est donc intéressant. Le retour d'effort permet d'aider ou de contrer le mouvement de la roue active. Le système peut donc simuler des pentes, ou des natures de sols différentes (tel que du bitume ou du sable par exemple) susceptibles de modifier l'inertie de la roue active et l'énergie nécessaire à son déplacement. Dans le simulateur (Colin S. Harrison, Grant, & Conway, 2004) le problème de la résistance du système est discuté. En effet, la résistance des moteurs, les tensions des courroies ainsi que le poids de l'utilisateur doivent être compensés pour obtenir la simulation la plus fidèle possible (pour que l'énergie dépensée par l'utilisateur soit cohérente).

Malgré cela, (Inman et al., 2011) montrent que des scénarios virtuels permettent d'apprendre et d'assimiler des compétences fonctionnelles réelles avec ce type de système. Même si les compétences mentionnées sont simples (suivre une ligne droite, s'arrêter, prendre un virage), il est donc possible d'entraîner les utilisateurs lors des premières heures d'entraînement à la conduite en fauteuil.

Retours haptiques - mouvement

Une plateforme de mouvement est un mécanisme permettant de simuler l'effet de mouvement. Elle permet d'effectuer des changements de rotation et/ou de fausses forces gravitationnelles. Il existe de nombreuses formes de plateforme de mouvement. Les contraintes telles que le prix et la taille diffèrent en fonction du système à déplacer. Les plateformes de mouvement sont utilisées pour

actionner des fauteuils avec écran pour de la conduite jusqu'à un salon d'appartement complet pour simuler des séismes.

Concernant les fauteuils roulants, nous retenons trois types de plateforme :

- La plateforme de Stewart (Figure 15) est la plateforme la plus complète en termes de degré de liberté. Elle permet de simuler les six degrés de liberté possibles (3 translations et 3 rotations). Elle est composée de six actionneurs linéaires fonctionnant en parallèle.
- Les "plateformes sur pivot" sont, comme leur nom l'indique, des plateformes ne pouvant que pivoter autour d'un point fixe; généralement, le centre de la plateforme (Figure 16).
- Une technique moins couteuse consiste à utiliser quatre vérins disposés aux quatre coins de la plateforme (Goncalves, Trenoras, Monacelli, & Schmid, 2014a). Ceci réduit à trois le nombre de degrés de liberté possible (deux rotations et la translation haut/bas).



Figure 15 : Exemple de plateforme de Stewart (Sonar et al., 2005)



Figure 16 : Exemple de plateforme sur pivot (Steyn, Hamam, Monacelli, & Djouani, 2010)

Ces plateformes sont commandées en fonction de modèles cinématiques et dynamiques de fauteuil roulant implémentés dans les simulations. (Sonar et al., 2005) se servent d'un modèle cinématique implémenté pour commander une plateforme de Stewart. Ce modèle théorique permet de reproduire les mouvements d'un fauteuil virtuel piloté par un joystick. Des études montrent qu'il est possible de reproduire fidèlement la dynamique d'un fauteuil roulant à l'aide d'une plateforme de mouvement. (Archambault, Routhier, Hamel, & Boissy, 2008) ont étudié les mouvements d'un vrai fauteuil lors de mouvements identifiés (avancer, tourner à droite/gauche, etc...). Ils en déduisent le modèle cinématique d'un fauteuil roulant électrique. La plage de fonctionnement des systèmes de mouvement actuels permet de simuler le mouvement d'un fauteuil roulant.

IV. Synthèse

Les simulateurs impliquant une approche centrée utilisateur sont appelés Environnements Virtuels. Un environnement Virtuel offre une expérience immersive et interactive durant laquelle l'utilisateur se sent plongé dans un monde virtuel.

Un « bon » EV reproduit les stimuli appropriés en fonction du message à transmettre et permet à l'utilisateur d'interagir de façon plus ou moins naturelle avec son environnement. Si l'immersion et l'interaction sont suffisantes, l'EV suscitera un sentiment de présence. Même si une part de ce sentiment reste à l'appréciation exclusive de l'utilisateur, il est aisé de comprendre que le réalisme du système y prend une part non négligeable.

Les EV appliqués au fauteuil roulant permettent d'une part d'étudier le comportement d'un fauteuil roulant et de son utilisateur et d'autre part de mettre l'utilisateur dans une situation de conduite spécifique dans des environnements difficilement réalisables en réel. Dans le premier cas, les interactions et l'immersion sont limitées.

On fait appel à l'imagination de l'utilisateur pour appréhender et analyser les données reçues soit à l'aide d'animations ou bien sur la base de données. Dans le cas de la mise en situation, l'apprentissage et la formation sont les objectifs clés. Pour cela, l'interaction doit être la plus naturelle et contrôlée possible afin que l'expérience acquise en virtuel soit rapidement transposable en réel. Pour la même raison, l'immersion doit être la plus complète et réaliste possible. Le réalisme est une notion subjective. Elle est dépendante de la sensibilité de l'utilisateur et de sa perception et de sa compréhension de la situation étudiée.

En RV, un EV est un système centré sur l'utilisateur dans lequel l'utilisateur doit se sentir présent afin de remplir des objectifs au sein du monde virtuel. Les simulateurs de fauteuil roulant utilisent des interfaces de commande issue d'un fauteuil réel : un joystick pour les fauteuils électriques et la main courante du fauteuil. L'interaction est donc intuitive. L'immersion est déterminée par l'ensemble de retours haptiques mis en place par le système. Il en existe trois : les retours visuels, haptiques (retour d'effort) et vestibulaires. Les simulateurs actuels ne combinent pas les trois retours en même temps. Un choix est souvent fait entre retour haptique et retour vestibulaire.

Chapitre 3

Conception de la plateforme

AccesSim

Mes travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet FUI *AccesSim* soutenu par la région Ile de France.

Le projet vise au développement d'un simulateur utilisant la Réalité Virtuelle afin d'aider à la conception d'environnements accessibles et à l'entraînement à la conduite de fauteuil roulant.

Pour réaliser cela, le projet regroupe les partenaires suivants :

- **EDF** réutilise et complète les développements réalisés pour la simulation de chantier.
- **CEREMH** (Centre de Ressources & d'Innovation Mobilité Handicap) évalue les besoins des personnes en situation de handicap, étudie et vérifie les solutions qui pourront être proposées.
- **LISV** (Laboratoire Ingénierie et Systèmes de Versailles). Ses travaux s'organisent suivant trois axes de recherche identifiés : évaluation, rééducation et compensation des incapacités. Il intègre la prise en compte des comportements suivant les capacités des utilisateurs.
- **Arts et Métiers Paris Tech** développe ses travaux dans la conception d'applications de réalité virtuelle et l'optimisation des processus de conception et d'innovation.
- Le **CEA List** développe une expertise dans la simulation des phénomènes physiques comme les contacts entre une roue et le sol.

Dans ce chapitre, nous allons détailler le projet *AccesSim*, ses objectifs, ses fonctionnalités ainsi que les développements qui lui sont associés. L'objectif est d'exposer le contexte et notre contribution en terme de conception et développement pour l'architecture du système *AccesSim*.

I. Objectifs

Le projet *AccesSim* vise à développer un outil logiciel d'aide au diagnostic d'accessibilité. L'outil peut s'étendre à la formation à la conduite en fauteuil roulant en intégrant une plateforme robotique. Au final, l'utilisation du simulateur doit permettre de :

- **former et sensibiliser** les architectes, les décideurs urbains et le grand public à la circulation en fauteuil roulant,
- **vérifier l'accessibilité** de nouveaux projets urbains (assistance à la maîtrise d'ouvrage) et de rénovation des ERP (Etablissements Recevant du Public),
- **aider à entraîner sans risque** les personnes récemment handicapées à l'utilisation d'un fauteuil roulant.
- **partager entre les laboratoires** un simulateur de fauteuil pour étudier et tester de nouvelles aides techniques (fauteuils, véhicules, équipements...).

Pour ce faire, au début du projet, le consortium a décidé d'utiliser les outils de simulation 3D et les concepts de la réalité virtuelle afin d'étudier et de monter différentes configurations du simulateur pour répondre à ces besoins (du PC portable seul jusqu'à un système avec une plateforme à rouleaux à retour d'effort couplée à des vérins et un système de projection).

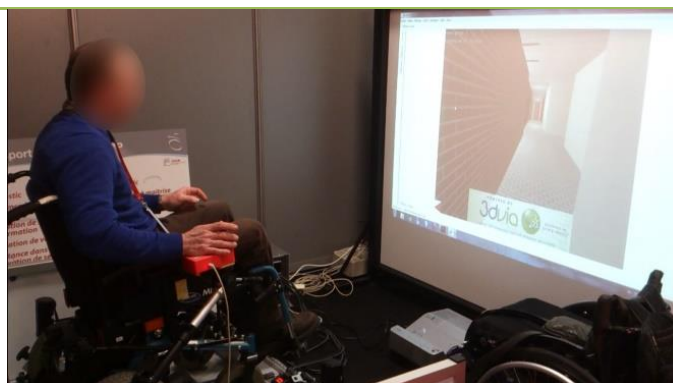


Figure 17 : La plateforme *AccesSim* utilisée par un UFR

Le simulateur doit remplir deux fonctions principales :

- **Visualisation métier** : Il doit permettre à un architecte de réaliser un diagnostic d'accessibilité. A partir d'une représentation 3D de l'environnement à étudier, l'environnement logiciel permet à un utilisateur de rassembler des données à partir de l'environnement (notes, commentaires, photos, etc...). Il fournit un outil, une méthodologie de travail aidant l'utilisateur à réaliser les diagnostics les plus complets possible.
- **Immersion** : En y couplant la plateforme robotique et ses différents composants, le simulateur permet également à un utilisateur de naviguer dans le monde 3D avec un fauteuil roulant. Grâce aux concepts de la réalité virtuelle, nous pouvons étudier comment simuler la conduite en fauteuil roulant la plus efficace et la plus réaliste possible.

Du côté logiciel, le simulateur doit pouvoir conjuguer deux types d'applications en une seule : une **application bureautique** standard ainsi qu'une **application 3D temps réel**.

Côté matériel, les objectifs principaux du projet posent trois contraintes principales concernant la plateforme robotique associée :

1. Les objectifs du système répondent aux besoins de différents utilisateurs pour réaliser différentes tâches. La plateforme doit être **modulaire** afin de correspondre au mieux à chaque utilisation prévue. Différents modules peuvent s'ajouter et interagir avec l'outil logiciel. Ces modules matériels peuvent être ajoutés ou enlevés indépendamment sans que cela perturbe le fonctionnement du logiciel.
2. L'entraînement à l'utilisation d'un fauteuil roulant implique de pouvoir accueillir et simuler n'importe quel type de fauteuil. La plateforme doit être **accessible** à tout type de fauteuils roulants (manuel ou électrique) à l'aide d'une simple rampe d'accès.
3. Enfin, la plateforme doit être **transportable** afin qu'elle puisse être déplacée d'un laboratoire à l'autre ou d'un centre à un autre. Une attention particulière sera portée sur son encombrement et son poids dans sa configuration complète afin de respecter les deux dernières contraintes.

Le projet *AccesSim* doit donc permettre de réaliser une évaluation de l'environnement, des préconisations et de l'entraînement. La notion centrale de ces trois objectifs est le déplacement. En effet, lors d'un diagnostic d'accessibilité, l'architecte doit se déplacer dans l'environnement et repérer les endroits en défaut par rapport à la législation. Ce déplacement peut se réaliser en fauteuil roulant (afin d'évaluer l'impact du défaut sur la mobilité d'un UFR) ou par tout autre Personne à Mobilité Réduite (PMR). Lors d'une phase de préconisation en situation réelle, une PMR ne peut rarement se déplacer dans son prochain appartement pour valider qu'il est adapté à son comportement et ses capacités. Le projet *AccesSim* permet cela en modélisant le futur appartement. Chaque modification apportée peut être évaluée, notamment au travers du déplacement. Lors d'une phase d'entraînement, un thérapeute peut placer un UFR dans des situations de conduite plus ou moins difficiles en fonction de son niveau. La navigation dans un EV peut être adaptée selon les configurations nécessaires pour le test.

II. Conception

Le projet *AccesSim* est un système qui se divise en deux parties. Une partie logicielle va permettre de se focaliser sur le diagnostic d'accessibilité en y apportant les avantages des outils de visualisation et simulation 3D. Une plateforme robotique va permettre de transmettre l'état de l'avatar virtuel à l'aide de canaux sensoriels (haptique et vestibulaire).

1. Environnement logiciel

L'outil logiciel doit conjuguer une application bureautique standard (application possédant une interface utilisateur graphique) ainsi qu'une application 3D temps réel (simulation 3D apparentée à un jeu vidéo). Or, les boucles logiques de ces deux types d'application ne fonctionnent pas de la même manière :

- Une application bureautique (telle qu'un explorateur internet par exemple) est une application événementielle. Chaque mise à jour de l'application, que ce soit les données ou l'interface, sera une réaction à un événement prédéfini interprété par l'application (clic sur un bouton, changement de taille de la fenêtre, etc...). L'application peut donc être en attente lorsqu'aucun événement n'est généré. Ce type d'application permet d'adapter les ressources matérielles nécessaires en fonction du nombre de processus lancés en parallèle et de l'activité utilisateur sur chacune d'elles (les applications inactives se placent en attente).
- Une application 3D temps-réel réalise un ensemble de tâches permettant de générer un rendu (une image) du monde à l'écran. Cet ensemble de tâches est appelé boucle de jeu (ou boucle de rendu). La boucle de jeu est généralement appelée 50 fois par seconde afin que les changements gérés par l'application paraissent fluides pour l'utilisateur. Une application 3D temps réel n'est donc jamais en attente. Lors de la boucle de jeu, l'application va elle-même chercher et mettre à jour toutes les données de la simulation ainsi que les actions de l'utilisateur. Ce type d'application est généralement prévu pour tourner en solitaire (on lance rarement deux fois le même jeu en même temps sur la même machine). Elle consomme donc beaucoup de ressources matérielles même si elle n'est pas l'application active du système d'exploitation.

Il y a donc conflit entre les boucles des deux types d'applications que nous voulons conjuguer. De plus, des outils très performants existent d'ores et déjà pour développer rapidement et efficacement des applications dans les deux domaines cités. Afin de profiter au maximum des outils existants, l'outil logiciel développé dans le cadre du projet est une application bureautique utilisant le principe d'« encapsulation de processus ». Le principe d'encapsulation, tel que nous l'entendons, consiste à lancer deux processus indépendants ayant une relation maître-esclave entre eux. Dans notre cas, l'application bureautique joue le rôle de maître de l'application 3D. Elle intègre la simulation 3D dans sa propre zone d'affichage et lui transmet des actions à exécuter. L'application 3D répond en conséquence.

L'outil logiciel du projet *AccesSim* est composé de deux processus (Figure 18) distincts :

1. L'application bureautique utilise la technologie « Windows Presentation Foundation » (WPF) développée par Microsoft™. Elle offre à l'utilisateur une interface permettant d'agir sur le

monde 3D et de gérer les données (textes, images, vidéos, etc...) produites pendant l'utilisation du logiciel.

2. L'application 3D est développée à l'aide du moteur de jeu 3DVIA Studio⁷ de Dassault Systèmes. L'application de simulation 3D gère la logique du monde virtuel et la communication avec la plateforme robotique. Elle est esclave de l'application bureautique pour réaliser ses tâches.



Figure 18 : Encapsulation de processus dans AccesSim

L'encapsulation nous permet de concevoir deux processus **indépendants** qui s'échangent des informations. L'avantage de ce procédé est que le choix des outils de développement est totalement indépendant car les processus créés sont autonomes. Il suffit que chaque processus intègre la méthode de communication pour que l'ensemble fonctionne. La communication entre les deux processus se fait par l'utilisation des « Memory mapped file » (MMF). Une MMF est une zone de mémoire permettant de partager des données entre les processus. Cette zone de mémoire spécifique est traitée comme fichier d'entrée/sortie virtuel de taille fixe. Une MMF est donc unique et accessible à tout processus la connaissant. Dans notre application, nous utilisons les MMF comme suit :

⁷ <http://www.3ds.com/fr/produits-et-services/3dvia/3dvia-studio/accueil/>

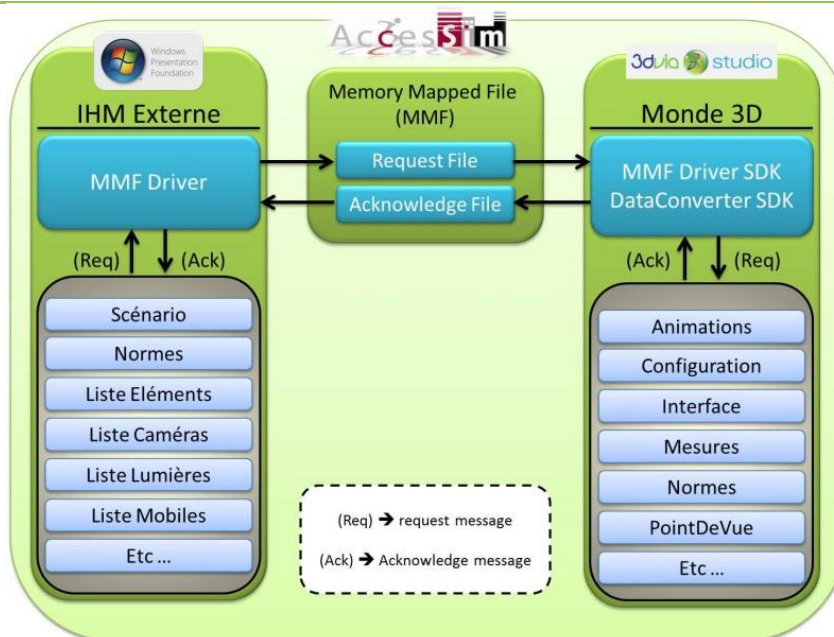


Figure 19 : Schéma de communication entre les deux processus de l'application

Pour éviter de possibles collisions de données, l'application bureautique WPF crée deux MMF dont l'accès concurrent est protégé (les deux processus ne peuvent accéder à une MMF en même temps). Une MMF servira de fichier de **requêtes** (de l'interface utilisateur vers le monde 3D) tandis que l'autre servira de fichier de **retours** (du monde 3D vers l'interface utilisateur). L'application 3D cherche à accéder à ses MMF de son côté. Ainsi, chacun des processus ne peut écrire que dans une seule MMF et idem pour la lecture. Chaque MMF fait transiter l'information dans un seul sens.

L'application logicielle est composée d'un cœur, c'est-à-dire un ensemble de fonctionnalité de base, auquel viennent d'ajouter des modules complémentaires. Ce procédé est valable pour les deux processus mis en œuvre. Pour l'application bureautique, le cœur concerne la gestion du scénario tandis que pour l'application 3D, il s'agit du chargement d'objet et de leur positionnement dans l'environnement. Vienne se greffer à ce cœur, des modules apportant des fonctionnalités supplémentaires tels que création d'images et de vidéos, gestion de mesures, gestion des périphériques de la plateforme, etc. Chaque processus étant distincts, le développement de chaque module est fait en deux parties : une pour chaque processus. Il faut en effet, des éléments d'interface afin que l'utilisateur puisse choisir et utiliser les modules et des éléments 3D permettant de modifier l'EV en conséquence.

En se basant sur cette architecture, nous avons établi une démarche de conception fondée sur les méthodes agiles. Les méthodes agiles vont à contre sens des approche prédictive de conception qui consiste à spécifier et planifier dans les détails l'intégralité du produit. L'idée des méthodes agiles et de se fixer un premier objectifs. Une fois ce dernier réalisé, le produit est adapté et amélioré par itération à plus ou moins court terme. Dans notre cas, Notre premier objectif a été le cœur de l'application. Une fois ce dernier validé, nous avons réalisé un processus itératif dont chaque itération représente le développement ou l'amélioration d'un module complémentaire.

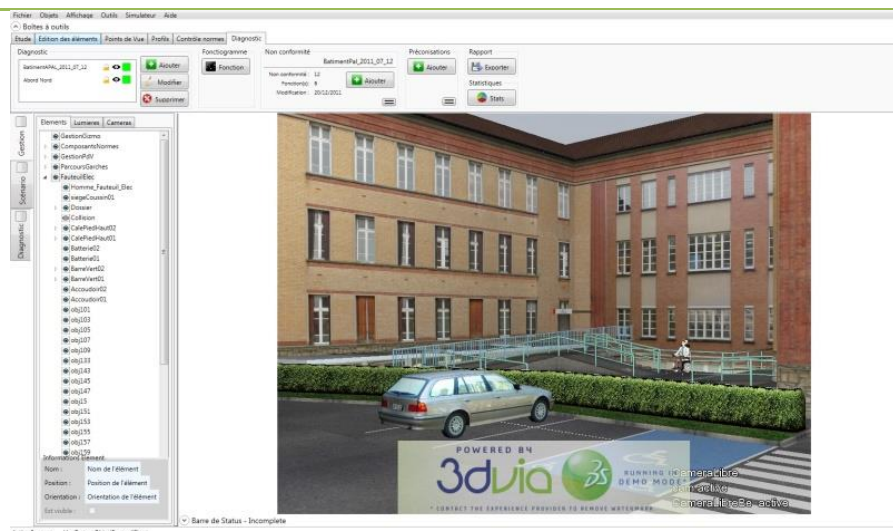


Figure 20 : Exemple d'interface dans AccesSim

2. Plateforme robotique

Le projet prévoit la conception d'une plateforme robotique pour répondre aux besoins de sensibilisation et d'entraînement. Afin de posséder une immersion suffisante et une interaction la plus naturelle possible, la plateforme est composée d'un système de projection, d'un système de mouvement ainsi que d'un système à retour d'effort. Avec ces éléments, la conception de la plateforme robotique se doit de respecter les trois contraintes fortes évoquées précédemment :

1. Modulaire
2. Accessible
3. Transportable

L'application robotique se présente comme suit :



Figure 21 : La plateforme robotique présentée lors du salon Urbaccess 2013

La modularité est gérée par l'application logicielle qui est capable de déterminer quels composants sont attachés à la plateforme et d'inhiber le comportement de certains objets en conséquence. L'application intervertit également les comportements de la plateforme (rouleaux et vérins) en fonction du type de fauteuil utilisé (Figure 22).



Figure 22 : Les différents types de fauteuil électrique (de gauche à droite : propulsion centrale, traction)

Les systèmes de projections utilisées sont :

- l'écran d'ordinateur,
- une projection sur toile tendue à l'aide d'un projecteur ultra courte focale placé à quelques centimètres de la surface de projection.
- Un HMD de type Oculus Rift^{®8} qui permet une immersion totale dans l'environnement virtuel.

Dans les deux derniers cas, la contrainte de transportabilité est respectée. En effet, il existe des cadres de projection pour toile tendue démontable dans le commerce à moindre coût. L'Oculus Rift quant à lui, ne pèse que quelque 400g et se range facilement dans sa boîte de développement dédiée.

L'interaction de l'utilisateur avec son environnement est fournie par les plateformes de mouvement et de retour d'effort.

La plateforme de mouvement est composée de quatre vérins électriques (Figure 23). Ces derniers permettent de gérer les inclinaisons de la plateforme robotique et donc du fauteuil. La plateforme de mouvement peut simuler les vitesses et accélérations selon trois 3 degrés de liberté :

1. Translation Haut/bas
2. Rotation Avant/Arrière
3. Rotation Gauche/droite

Les quatre vérins se positionnent aux quatre « coins » de la plateforme (Figure 23). C'est donc un système relativement simple à mettre en place. De plus, la hauteur minimale de travail de la plateforme n'est que de quelques centimètres (entre 10 et 15 selon le type de vérins). Il suffit donc d'un simple plan incliné pour pouvoir monter sur une plateforme équipée d'un tel système de mouvement. La plateforme reste donc accessible à tous les types de fauteuil.

⁸ <http://www.oculusvr.com>

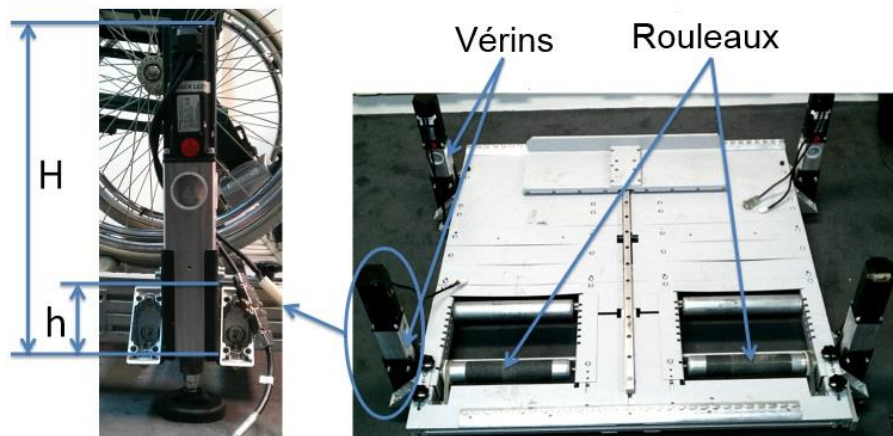


Figure 23 : Les périphériques d'interaction

Le système à retour d'effort est un système à rouleaux sur lesquels vient de poser les roues actives du fauteuil. Ce système permet à l'utilisateur de piloter son fauteuil de manière naturelle en exerçant un couple sur les roues actives (à l'aide du joystick pour les fauteuils électriques ou à l'aide des mains courantes pour les fauteuils manuels). On conserve également les avantages évoqués dans le chapitre 2 : simulation de l'inertie des roues et des types de sol rencontrés.

La plateforme, dans sa configuration complète, représente un poids total de 125 kg. Les éléments les plus lourds sont les rouleaux (environ 50 kg, baie de contrôle et moteurs compris) puis les vérins (4x5 kg) et enfin le reste de l'équipement (ordinateur, surface de projection, fauteuil électrique, etc...). L'ensemble des périphériques d'interaction robotiques pèse environ 65 Kg répartis en deux modules séparés. L'espace minimal occupé par une telle plateforme est de 2.5mx2m sans compter le plan incliné permettant de monter sur la plateforme.

Dans sa configuration complète, le simulateur offre trois types de retour sensoriel : un retour visuel, un retour haptique comprenant le « toucher » et le « mouvement ». Les retours sensoriels sont essentiels à l'immersion de l'utilisateur. Ils permettent à l'utilisateur de connaître son état dans l'environnement virtuel.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous nous basons sur la navigation physique pour piloter les rouleaux et les vérins. La boucle de commande de ces deux interfaces est schématisée dans les figures suivantes :

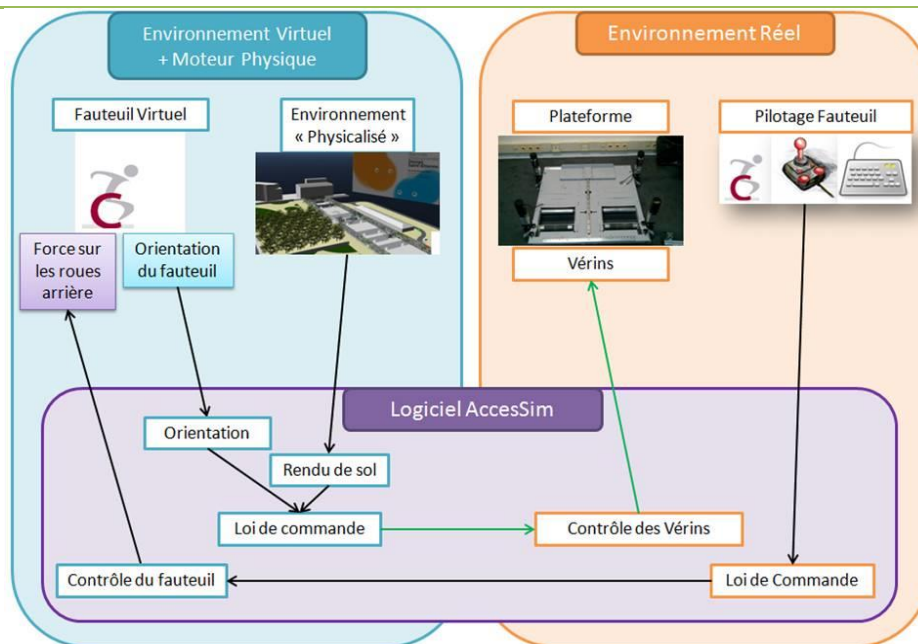


Figure 24 : Boucle de commande pour les vérins

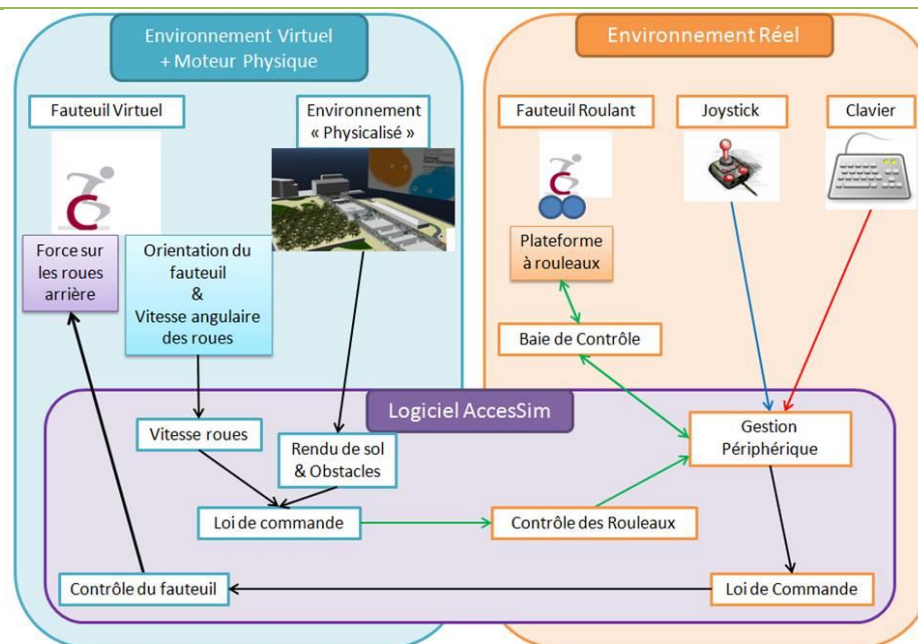


Figure 25 : Boucle de commande pour les rouleaux

Afin que ces retours soient les plus réalistes possible, il faut que les données calculées par la simulation soient elles aussi, les plus réalistes possible.

Lorsque l'utilisateur utilise l'une de ces interfaces de commande, une loi de commande est appliquée pour traduire les actions de l'interface en données exploitables par le fauteuil. Ce dernier peut alors exercer des forces sur les roues actives et ainsi activer le déplacement du fauteuil. La physique appliquée au fauteuil ainsi qu'à l'environnement permet de simuler la dynamique du fauteuil et le rendu du sol. Ces paramètres sont utilisés par le contrôle des interfaces pour calculer les retours à l'utilisateur.

Dans notre conception, le réalisme du comportement de la plateforme robotique (au travers des retours sensoriels) est conditionné par le modèle dynamique de fauteuil roulant virtuel. Ce modèle est décrit dans le moteur physique (voir la section « La navigation virtuelle en fauteuil roulant »). Ainsi l'adaptation du modèle permet d'adapter les retours. L'adaptation de la simulation passe donc par modifier les paramètres des lois de commande du modèle dynamique du fauteuil.

Le projet *AccesSim* a permis le développement d'un simulateur de fauteuil roulant contenant une application bureautique permettant d'aider à la création d'un rapport d'accessibilité et une simulation 3D immersive gérant une plateforme robotique pour la navigation en fauteuil roulant. L'expérience de navigation peut être adaptée à l'utilisateur en sélectionnant les composants robotiques (et les retours sensoriels qui leur sont associés) à utiliser. L'application bureautique et la simulation ont permis de développer des fonctionnalités spécifiques que nous allons décrire par la suite.

III. Fonctionnalités

1. L'aide au diagnostic d'accessibilité

En France, l'Association Française de Normalisation (AFNOR) a élaboré un recueil de normes concernant l'accessibilité ainsi que le diagnostic (Afnor, 2011). Les textes réglementaires sur l'accessibilité apportent un certain nombre d'obligations quant à la structuration de projet urbain recevant du public. Un diagnostic d'accessibilité ne consiste pas seulement en un ensemble de points non conformes à la loi. Ce diagnostic doit comporter des solutions permettant d'améliorer l'accessibilité ainsi qu'une estimation des coûts des travaux.

L'objectif d'un diagnostic est de relever l'ensemble des non-conformités de l'environnement. Une non-conformité est un élément ne respectant pas les textes réglementaires. Une non-conformité est toujours liée à un type de déficience (motrice, visuelle, auditive, etc...). Elle possède un impact différent sur la mobilité des personnes. En fonction des profils de personnes concernées et de l'impact des non-conformités, des préconisations (c'est-à-dire des modifications à apporter) sont élaborées. Chaque préconisation possède un coût qu'il faut prendre en compte pour établir les priorités de construction en fonction des fonds disponibles. La méthode de recensement des non conformités est globalement unique. Il s'agit de se déplacer dans l'environnement afin de valider les chemins qui lient des fonctions (accueil, entrée, etc...) entre elles. Lors du déplacement, on analyse les éléments rencontrés (porte, couloir, pente, etc...). Pour chaque élément, on étaye la ou les non-conformités rencontrées par des mesures et/ou des photos.

L'outil logiciel permet donc aux architectes et décideurs urbains d'utiliser les avantages de la visualisation et de la simulation 3D afin de diagnostiquer des environnements à partir de plan 2D et/ou 3D. Nous schématisons l'utilisation de l'outil de la manière suivante (Figure 26) :

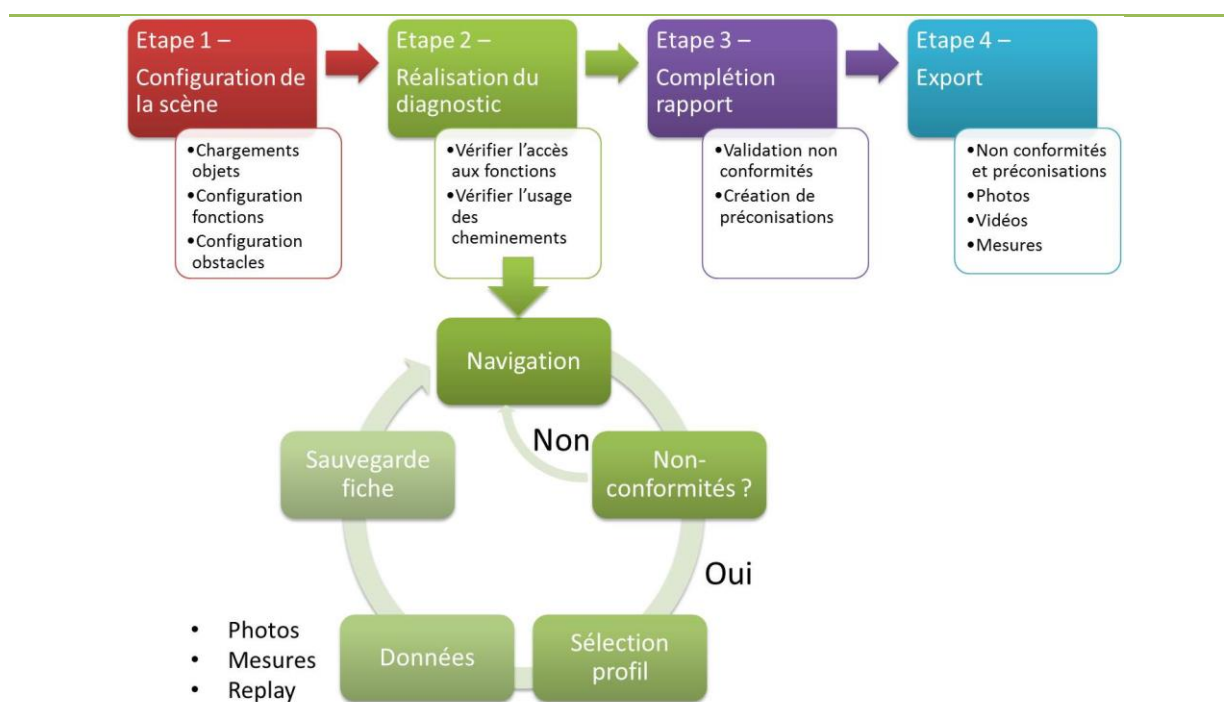


Figure 26 : Scénario de diagnostic d'accessibilité proposé dans AccesSim

En suivant ce scénario d'utilisation, l'application logicielle contient les fonctionnalités suivantes :

- **Configuration de scène** : Chargement des différents composants fonctionnels, des données 3D des environnements urbains, des obstacles et des éléments mobiles (véhicules, fauteuils, personnages).
- **Mise en place de parcours** : Mise en place d'un réseau de déplacement composé de nœuds de passage et de liaisons entre ces nœuds avec des indices de difficulté suivant la déficience et les capacités des profils utilisateurs. Ces fonctions vont permettre de proposer un parcours adapté pour chacun des profils.
- **Sélection d'un profil de capacité et navigation** : Choix d'un profil avec les comportements associés (fauteuil électrique ou manuel) qui sera déplacé dans les scènes avec les moyens de navigation (clavier, souris, joystick, plateforme) et les points de vue associés (vue libre, suivi élastique, vue subjective).
- **Mesure** : Utilisation d'outils de prises de mesures, de vérification de dimensions et de mise en place de cotations pour contrôler l'application des valeurs dimensionnelles des normes d'accessibilité.
- **Annotation de différentes zones de diagnostic de la scène** : Permet d'annoter la scène dans la 3D, afin de pouvoir constituer un registre d'annotations exportables pour l'étude de l'amélioration de la structure étudiée et faciliter le repérage des zones concernées.
- **Modification de la scène et proposition d'amélioration** : Utilisation d'outils de déplacement, rotation, liaison hiérarchique, chargement, suppression d'objet pour modifier et faire des propositions d'agencement de la scène. Des fonctions d'affichage faciliteront la navigation et la lecture de la scène. En complément un outil de présentation des bonnes pratiques d'aménagement sera proposé avec une bibliothèque d'objets 3D correspondants aux aides techniques possibles.
- **Mise en place de scénarios** : Toutes les actions (chargement de scène, d'objet, de profil, modification, annotations ...) réalisées dans la scène pourront être enregistrées dans un scénario et rejouées, soit pour revenir sur un problème de diagnostic, soit pour proposer différentes améliorations, soit pour réaliser une revue d'un projet avec tous les acteurs concernés.
- **Outil de diagnostic** : Fournit une assistance pour faire les relevés des non-conformités, préparer les préconisations d'amélioration et produire les documents de synthèse.

Le point central du diagnostic tel que nous l'avons défini précédemment (Figure 26) est la navigation. Lors de la navigation, il faut donc pouvoir illustrer les problèmes d'accessibilité mais également l'impact de l'environnement sur la personne en prenant en compte les capacités de cette dernière. Pour cela, il nous faut un modèle de fauteuil roulant que l'utilisateur va pouvoir piloter.

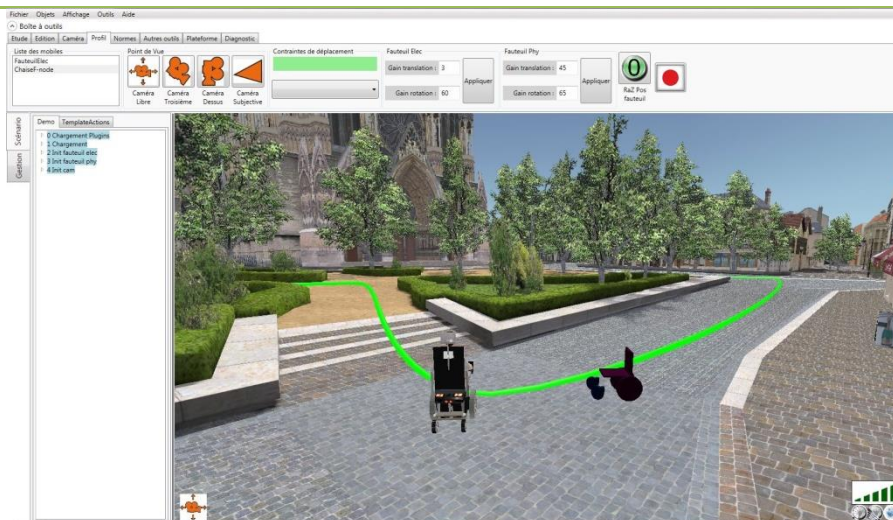


Figure 27 : Exemple de scénario de cheminement dans AccesSim

2. La navigation virtuelle en fauteuil roulant

Afin de pouvoir tester les environnements simulés, nous avons proposé trois types de navigations différentes :

La navigation libre correspond à la navigation métier utilisée par un architecte. Elle se fait à l'aide des mouvements de la caméra. L'utilisateur pilote la caméra comme dans les applications 3D classiques (souris + clavier). La caméra n'est soumise à aucune contrainte spécifique.

La navigation simplifiée fait appel à un modèle de fauteuil roulant simplifié. Le modèle intègre les mouvements d'un fauteuil roulant classique en translation et rotation. Contrairement à la navigation libre, ce type de navigation est soumis à deux contraintes. Premièrement, il doit procéder à un suivi de sol (en distance et orientation). Secondement, il doit procéder à une gestion simple des obstacles (en calculant l'intersection des boîtes englobantes⁹).

Ce type de navigation sert à se déplacer rapidement dans l'environnement afin d'illustrer certaines normes d'accessibilité de manière graphique et visuelle. Pour cela nous mettons à disposition de l'utilisateur la possibilité de placer des formes géométriques centrées sur l'avatar (Figure 28 et Figure 29). Ces formes géométriques appelées « patron de norme » sont des éléments qui permettent d'effectuer certaines mesures à l'œil nu. Il suffit de noter s'il y a interpénétration entre le patron de norme sélectionné et l'environnement. Dans les deux exemples suivant, on peut très facilement examiner la largeur de couloir nécessaire à un fauteuil roulant ainsi que la distance maximum d'une pente à 5% dans la législation.

⁹ *Bounding box* en anglais : ce terme désigne les dimensions et la position de la plus petite boîte qui puisse contenir tous les points de la géométrie d'un objet 3D.



Figure 28 : Patron de normes pour les largeurs de couloir



Figure 29 : Patron de norme pour les pentes à 5%

Ce type de navigation est principalement utilisé avec une caméra dite « à la troisième personne » centrée sur l'avatar comme on peut le voir sur les figures d'illustration. Ceci permet de suivre l'avatar dans ses déplacements tout en conservant une vue extérieure de l'interaction entre l'avatar et l'environnement proche.

La navigation physique répond au besoin de rendu réaliste de la dynamique de déplacement d'un fauteuil roulant. Le modèle ne se base plus seulement sur la géométrie de l'environnement mais y ajoute les fonctionnalités d'un « moteur physique¹⁰ ». L'utilisation d'un moteur physique permet de créer et simuler un système mécanique rigide. A l'instar du réel, le système mécanique est un ensemble de corps rigides pour lesquels on décrit les propriétés dynamiques (masse, inertie, etc...) et la forme. Les corps rigides qui composent le fauteuil roulant virtuel (voir Figure 30) sont liés entre eux par des liaisons de type pivot. Le modèle dynamique du fauteuil ainsi créé permet de piloter le fauteuil par l'application de forces sur les roues actives du fauteuil et de simuler le comportement des roues folles du fauteuil.

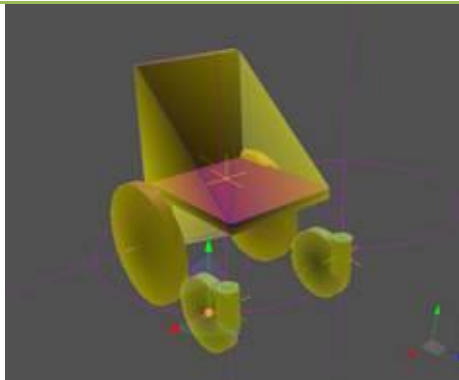


Figure 30 : Fauteuil physique dans AccesSim (les enveloppes semi transparentes sont les formes de collisions)

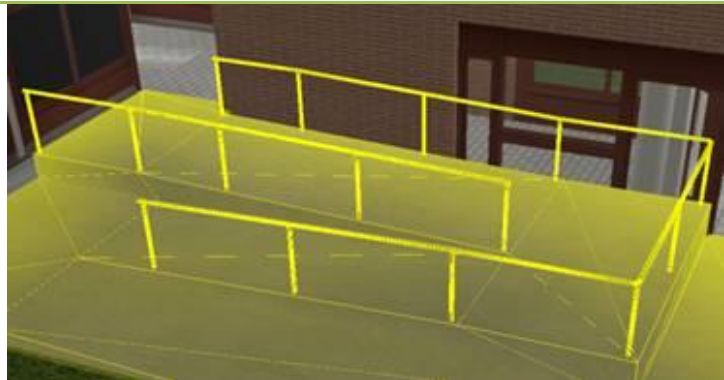


Figure 31 : Exemple de sol physicalisé (les enveloppes semi transparentes sont les formes de collisions)

La description physique de l'environnement ne concerne pas seulement le fauteuil mais aussi l'environnement. En fonction de la complexité géométrique de la scène, un travail non négligeable doit être porté sur la physicalisation de l'environnement. Il est en effet nécessaire de traiter/modifier

¹⁰ Un moteur physique permet la résolution informatique de problème de la mécanique classique. Les problèmes les plus traités en simulations et jeux vidéo sont les collisions, la chute des corps et la cinétique des objets.

les objets de la scène 3D et de les physicaliser afin d'obtenir une interaction cohérente entre le fauteuil et son environnement (voir Figure 31). Ainsi pour chaque objet dans l'environnement, il faut définir les caractéristiques suivantes :

- Type de corps (fixe ou dynamique)
- Forme de collision (Shape)
- Propriétés dynamiques (masse, coefficient de frottement, inertie, etc...)

La physicalisation de l'environnement doit être effectuée en gardant à l'esprit que la résolution du système physique entier doit respecter les contraintes de temps réel pour ne pas gêner l'interaction (Barfield & Hendrix, 1995). Le moteur physique prend en compte le nombre de corps rigide en interaction ainsi que leur « Shape » (i.e. la forme du corps rigide) appliqué à chacun d'eux. Il est alors évident que plus l'environnement est complexe, plus le travail de physicalisation doit être important.

Comme le modèle physique est le plus réaliste en termes de comportement, il est lié à la plateforme robotique. Autrement dit, cette dernière (lorsque ces éléments sont fonctionnels) ne réagit qu'aux états du modèle dynamique afin d'avoir le comportement le plus proche possible de la réalité. Ce type de navigation est principalement utilisé avec une caméra dite « à la première personne ».

Les méthodes de navigation actuelles sont principalement focalisées sur les fauteuils roulants. Malgré cela, le même type de démarche peut être entrepris pour d'autres catégories de personnes utilisant d'autres aides techniques (gyropode, poussette, etc...).

Différents niveaux d'immersion et de réalisme sont donc proposés pour la tâche de conduite dans le simulateur. Ces niveaux dépendent du type de navigation choisi, des mouvements de la caméra et des différentes interfaces connectées à la plateforme robotique. Pour un outil d'entraînement et de préconisation, il faut pouvoir évaluer l'impact de l'environnement sur un utilisateur de fauteuil roulant. Pour un utilisateur donné, il faut s'assurer que la conduite en virtuel sur le simulateur soit la plus proche possible de la conduite en réel. La question est donc d'évaluer le réalisme de la simulation avec une certaine configuration de la plateforme. Pour cela, nous utilisons une méthodologie développée au sein du laboratoire permettant d'analyser le comportement utilisateur.

Chapitre 4

Analyse de comportements

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la navigation dans l'environnement virtuel occupe une place non négligeable dans l'utilisation de la plateforme que ce soit pour de la sensibilisation ou pour de l'entraînement. Lors de l'utilisation d'un environnement virtuel, il faut s'assurer que l'utilisateur réagisse de manière comparable entre une situation réelle et sa simulation dans un environnement virtuel. L'objectif est que les sensations éprouvées lors de la conduite dans l'environnement virtuel engendrent les mêmes réactions que celles que l'on pourrait éprouver en situation réelle.

I. Introduction

Les applications de notre EV sont l'évaluation de l'environnement au travers de l'accessibilité et l'entraînement à la conduite en fauteuil. Ces deux applications sont destinées à des profils utilisateurs différents que sont respectivement les architectes et les UFR. Ces applications ont pour point central la navigation. Cette dernière demande des configurations de la plateforme plus ou moins complexes selon le réalisme et le degré d'immersion que l'on souhaite obtenir.

Nous avons vu dans le chapitre « Les simulateurs de fauteuils roulants » qu'un simulateur de fauteuil roulant pour l'entraînement doit enseigner à l'utilisateur des compétences à appliquer en situation réelle à l'aide de l'EV. Il faut donc s'assurer au préalable de la transposition de ces connaissances. L'un des moyens de valider la transposition de connaissance est de s'assurer que les performances de conduite entre situation réelle et situation virtuelle soient semblables.

L'utilisation de notre simulateur demande de valider la transposition de connaissances et le réalisme des retours sensoriels. Pour cela nous avons mené deux expérimentations (Goncalves et al., 2012).

La première expérimentation a été menée conjointement dans le cadre des travaux de thèse « méthodologie d'évaluation de performances basée sur l'identification de modèles de comportement » (Amina Gacem, 2013). Cette méthodologie permet d'identifier et de classer des comportements utilisateurs en se basant sur des comportements de référence (identifiés sur base d'experts). L'identification est basée sur des méthodes de classification basées sur le calcul d'indicateurs de performances.

L'objectif de cette expérimentation est d'évaluer l'influence de la plateforme sur le comportement de l'utilisateur. Pour cela, nous allons appliquer cette méthodologie d'évaluation de performances afin de comparer les comportements des utilisateurs lors de la conduite dans un parcours spécifique en situation réelle et virtuelle. En comparant les deux jeux de données, nous pourrions évaluer si les comportements de conduite sont perturbés par l'utilisation de la plateforme.

La seconde expérimentation a été menée dans le cadre de l'exposition du simulateur au salon Laval Virtual. L'objectif est d'évaluer qualitativement l'impact de différents retours sensoriels sur la perception de mouvement et donc de l'immersion de l'utilisateur.

II. Evaluation de performances

1. Méthodologie d'évaluation

Dans cette étude, (Amina Gacem, 2013) représente un comportement par un vecteur d'indicateurs de performance. Ces indicateurs sont définis selon l'application étudiée et sont calculés à partir des actions effectuées par l'utilisateur sur l'interface de commande utilisée pour réaliser la tâche.

La méthodologie d'évaluation proposée dans sa thèse repose sur la comparaison de comportements. Elle est itérative et empirique.

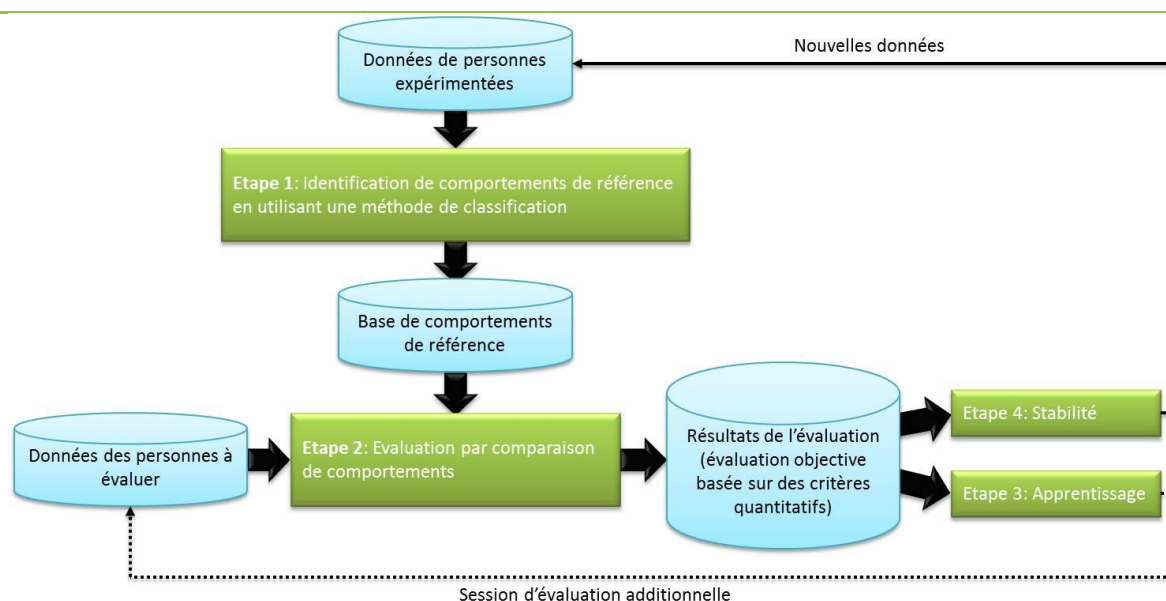


Figure 32 : Schéma représentant les différentes étapes de l'évaluation

La première étape consiste à créer une base de comportements de référence. Cette dernière est construite par l'application par une méthode de partitionnement de données nommée la méthode de classification Fuzzy C-Means (voir Annexe 1) à partir des comportements identifiés sur une population expérimentée dans le domaine d'évaluation. L'application de cette méthode de partitionnement permet d'extraire différents groupes de comportements associés aux classes qui seront identifiées.

La deuxième étape est la phase d'évaluation proprement dite. Elle est effectuée par comparaison du comportement de la personne à évaluer et la base de comportements de référence à identifier. Elle permet aussi de déduire l'évolution du comportement de cette personne dans le temps.

Dans le cas où la personne évaluée reste dans une phase d'apprentissage avec un comportement qui évolue au cours du temps, il faut continuer l'évaluation. On se place alors dans l'étape 3.

Une fois le comportement devenu stable, la base de comportement de référence peut être enrichie au fur et à mesure en lui ajoutant les personnes devenues expérimentées suite à l'évaluation. Il s'agit de l'étape 4.

La validation de cette méthodologie s'est faite dans le cadre de deux applications. La première concerne l'évaluation de la conduite en FRE en situation réelle. Cette méthodologie a ensuite été appliquée dans le cadre du projet *AccesSim* afin d'étendre les résultats de la première application. En effet, nous pouvons alors comparer les comportements de conduite de fauteuil roulant électrique déterminés en situation réelle à ceux trouvés dans un environnement virtuel.

2. Application sur un cas réel

L'un des cas d'application de cette méthodologie est l'identification des comportements de conduite en fauteuil roulant électrique (A. Gacem et al., 2012).

Cette première étude utilise le fauteuil roulant électrique Typhoon commercialisé par la société Invacare®. Ce fauteuil a été équipé d'une centrale inertielle (développée au laboratoire). Il est ainsi possible de récupérer les actions joystick d'un conducteur de fauteuil roulant durant sa conduite

Deux populations de valides ont utilisé le fauteuil pour réaliser le parcours.

Tableau 1 : Populations participant aux tests d'évaluation en situation réelle

	Age (Moyenne \pm ET)	Genre (H/F)	Total
Expérimentés	28.46 \pm 5.8	7/1	8
Novices	26.08 \pm 2.1	3/3	6
Personne en situation de handicap	24	0/1	1

En suivant la méthodologie décrite précédemment, les huit personnes expérimentées ont été évaluées sur le parcours et ont permis de créer la base de comportements de référence. Ces personnes (que nous nommerons UE1, UE2, etc...) ont bénéficié de plusieurs séances de conduite libre avant les tests de conduite afin de s'adapter à la conduite du fauteuil et d'en avoir une bonne maîtrise. Les tests ont consistés en huit séances à raison de deux séances par jour espacées de trois heures minimums

Ensuite, le groupe de six novices (que nous nommerons UN1, UN2, etc...) est évalué sur le même parcours avec seulement cinq minutes de préparation. Les tests ont consisté en huit séances à raison d'une séance par jour. Trois de ces personnes novices ont effectué huit séances supplémentaires afin de continuer à évaluer la stabilité de leur comportement de conduite.

Enfin, une personne en situation de handicap a été évaluée sans aucun entraînement préalable. Comme elle utilise un fauteuil roulant électrique dans sa vie quotidienne, elle est considérée comme expérimentée dans la conduite de fauteuil.

Le parcours à réaliser pour effectuer une séance de test est le suivant :

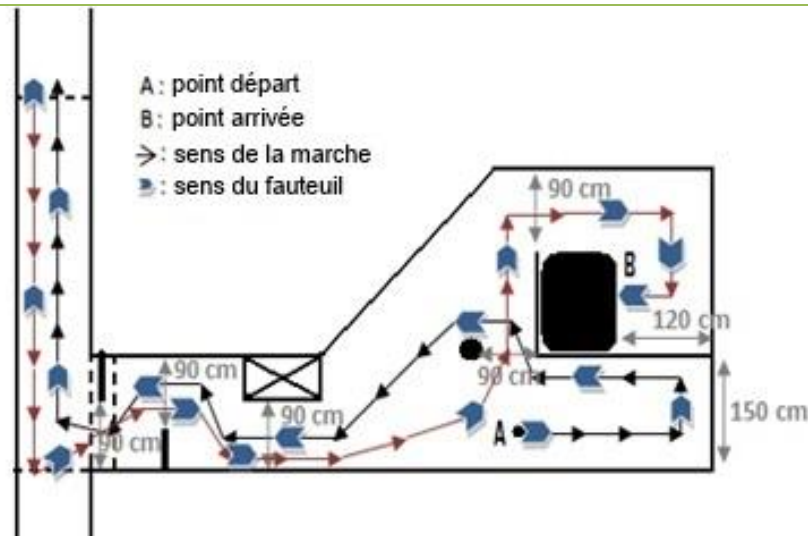


Figure 33 : Parcours d'évaluation (A est le point de départ et B le point d'arrivée)

Il respecte les normes d'accessibilité en vigueur. Il est basé sur le Wheelchair Skills Training Program (WST-P) de (Arya, 2011) et (Routhier, Kirby, Demers, Depa, & Thompson, 2012). Il s'agit d'un programme d'entraînement canadien composé en ateliers permettant d'apprendre à conduire un fauteuil roulant. Le parcours réalisé représente donc un exemple de parcours d'entraînement en fauteuil. Il représente un ensemble de tâches de la vie quotidienne à réaliser en un seul parcours. L'objectif est de placer l'utilisateur dans une situation de conduite écologique, c'est-à-dire une situation dans laquelle les capteurs n'influencent pas (ou peu) le comportement de l'utilisateur et qui représente une utilisation courante.

Les indicateurs de performances sont basés sur les actions joystick réalisées par l'utilisateur durant le parcours. Ils sont basés sur le déplacement, la vitesse et l'accélération du joystick. Ces indicateurs sont au nombre de sept :

1. Amplitude moyenne de déplacement : $A_m D = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T D(t)$ (1)

2. Nombre d'actions utilisateur : $NAU = N_{max}(D(t)), 0 < t < T$ (2)

3. Energie du déplacement : $E_D = \int_0^T D^2(t) dt$ (3)

4. Amplitude moyenne de la vitesse : $A_m V = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T V(t)$ (4)

5. Energie de la vitesse : $E_V = \int_0^T V^2(t) dt$ (5)

6. Amplitude moyenne de l'accélération : $A_m A = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T A(t)$ (6)

7. Energie de l'accélération : $E_A = \int_0^T A^2(t) dt$ (7)

Où

- T est le temps de réalisation du parcours

- $D(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$ (8)

- $V(t) = \sqrt{V_x(t)^2 + V_y(t)^2}$ avec $V_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ et $V_y(t) = \frac{dy(t)}{dt}$ (9)

- $A(t) = \sqrt{A_x(t)^2 + A_y(t)^2}$ avec $A_x(t) = \frac{dV_x(t)}{dt}$ et $A_y(t) = \frac{dV_y(t)}{dt}$ (10)

Dans cette application, un comportement est donc défini par un vecteur de la forme suivante :

$$X = (NAU, A_m D, E_D, A_m V, E_V, A_m A, E_A)^T \quad (11)$$

La procédure d'évaluation permet d'identifier les phases d'apprentissage de la conduite (les phases ayant un comportement instable au cours du temps) mais également d'identifier les personnes devenues expérimentées. En effet, la comparaison de la distance entre le vecteur de performances du sujet et ceux des comportements types au cours des différentes séances, permet d'évaluer la stabilité du comportement. Prenons l'exemple des trois utilisateurs novices UN1, UN2 et UN3 ayant réalisé huit séances supplémentaires. Nous présentons dans la Figure 34 la distance séparant le comportement de l'utilisateur aux deux comportements type CT1 et CT2, de la base de comportements de référence.

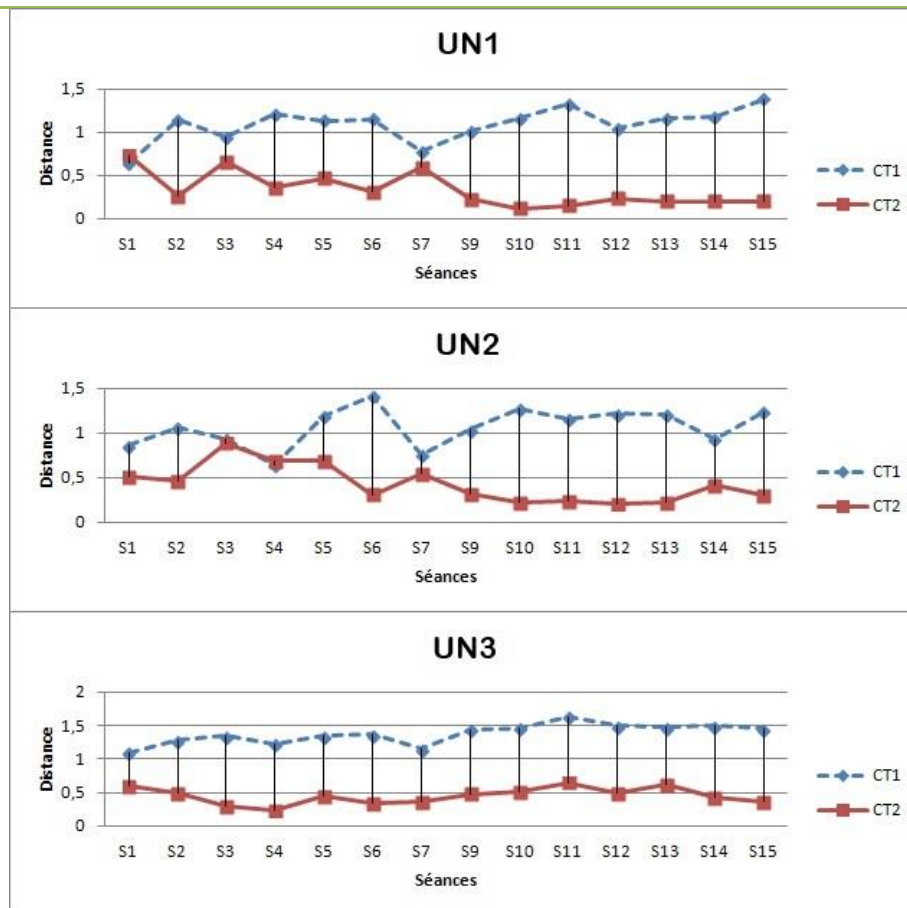


Figure 34 : Evolution des utilisateurs novices au cours des séances.

Nous constatons que le comportement est irrégulier durant les premières séances. En effet, nous constatons que la distance calculée varie pour UN1 et UN2 entre la première et la septième séance (respectivement s1 et s7 sur la Figure 34). Le comportement des sujets est qualifié d'instable. Puis le comportement se stabilise autour d'un comportement fixe à partir de la neuvième séance. Le sujet est donc devenu stable en compétences.

L'application de cette méthodologie dans le cadre de la conduite en fauteuil roulant électrique a permis d'identifier deux types de comportement de référence : un type dynamique et nerveux contre un deuxième plutôt calme et souple. Cette méthodologie se basant sur les actions du joystick, il est très facile de l'appliquer à un EV. La comparaison des comportements obtenus entre situation réelle et situation virtuelle nous permet alors d'évaluer les performances de notre EV. Nous pouvons évaluer dans quelle mesure notre simulateur influence le comportement de l'utilisateur.

3. Extension à un environnement virtuel

L'extension de cette méthodologie dans le cadre d'AccesSim permet de proposer une évaluation de la plateforme. Il s'agit de vérifier si l'environnement virtuel a ou non un effet sur le comportement de l'utilisateur.

Le protocole consiste à réévaluer les mêmes personnes ayant participé à l'évaluation en situation réelle. Cela correspond à onze personnes, parmi les personnes expérimentées et les personnes

novices devenues expérimentées suite à la première évaluation, qui sont évaluées sur le même parcours écologique avec la même fréquence de séance. Nous avons donc la population suivante :

Tableau 2 : Population participant aux tests d'évaluation en situation virtuelle

	Age (Moyenne \pm ET)	Genre (H/F)	Total
Expérimentés	29.39 \pm 4.3	7/4	10

Ainsi, le parcours d'évaluation et les processus de récupération de données joystick ont été modélisés dans la plateforme *AccesSim*. La configuration utilisée pour cette étude est la configuration de base. Elle est composée d'une projection sur un mur et d'un fauteuil roulant électrique muni d'un joystick à partir duquel on peut récupérer les positions. Le fauteuil a été placé sur la plateforme avec rouleaux et vérins inactifs.



Figure 35 : Configuration de la plateforme utilisée

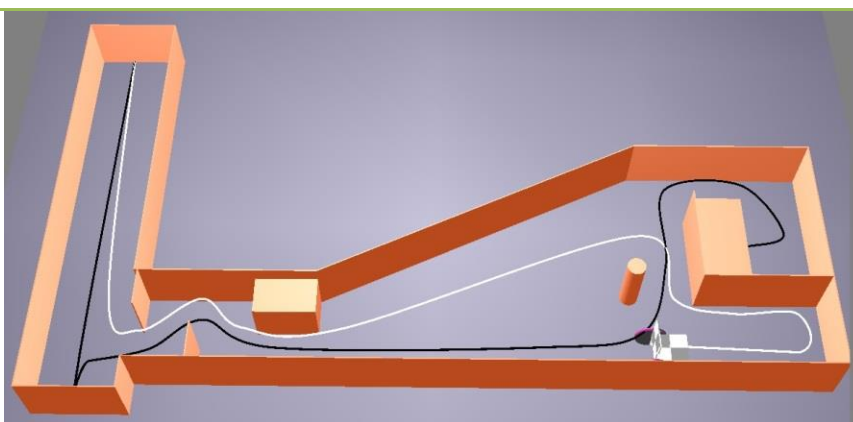


Figure 36 : Modèle 3D du parcours d'évaluation avec la trajectoire à effectuer dans le parcours

La caméra effectue un suivi excentré du fauteuil afin que l'utilisateur ait des informations semblables entre la situation réelle et virtuelle. L'utilisateur ne peut pas orienter la caméra durant la simulation. Il ne peut donc pas connaître l'état des roues arrières par rapport à l'environnement avec une vue à la première personne.

4. Comparaison des résultats

La première étape consiste à valider la stabilité de la conduite de chaque personne. Pour cela, le test de Kruskal-Wallis (voir Annexe 2) est effectué afin de comparer les données entre toutes les séances.

Tableau 3 : Résultats du test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des données en situation réelle et virtuelle.

Utilisateurs	Pvalue pour conduite réelle	Pvalue pour conduite virtuelle
UE1	0.909	0.874
UE2	0.972	0.993
UE3	0.981	0.943
UE4	0.954	0.959
UE5	0.893	0.115
UE6	0.358	0.622
UE7	0.930	0.406
UE8	0.560	0.875

UE9	0.995	0.675
UE10	0.980	0.784

Les résultats du Tableau 3 montrent qu'il n'y a pas de différence significative sur les données de chaque utilisateur durant toutes les séances (toutes les valeurs de Pvalue sont supérieures à 0.05) malgré le biais du rendu visuel excentré. On peut donc conclure que chaque sujet possède une conduite stable. Chacun reproduit à chaque séance le même comportement de conduite. Nous validons donc le profil expérimenté.

La seconde étape consiste à valider le nombre de classes obtenues en situation virtuelle et de les comparer aux classes préalablement obtenues en situation réelle. En appliquant la méthode de classification FCM avec différents nombres de classes de départ, on retrouve également deux classes de comportement. Le Tableau 4 représente les résultats de la classification FCM en 2 classes pour les deux cas d'évaluation.

Tableau 4 : Résultats de la classification FCM en 2 classes avec comparaison des classes via le test de Wilcoxon

	Réelle	Virtuelle
Classification FCM	CR1 = {UE6, UE8, UE9 } CR2 = {UE1, UE2, UE3, UE4, UE5, UE10, UE7 }	CV1 = {UE6, UE8, UE7 } CV2 = {UE1, UE2, UE3, UE4, UE5, UE10, UE9 }
Pvalue	0.005895	0.005821

Nous constatons le même groupement de personnes dans les deux situations. Ces résultats montrent que nous obtenons deux classes significativement différentes (les valeurs Pvalue du test de Wilcoxon sont inférieures à 0.05). Il s'agit, dans les deux cas, de deux comportements de conduite différents.

Nous comparons alors les classes deux à deux entre la classe obtenue en situation réelle et son pendant obtenu en situation virtuelle (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats de la comparaison de classes réelle et virtuelle à l'aide du test de Wilcoxon.

	Pvalue
Comparaison entre CR1 et CV1	0.998
Comparaison entre CR2 et CV2	0.535

Les comparaisons entre les classes obtenues en situation réelle et celles obtenues en situation virtuelle montrent qu'il n'y a pas de différence significative. Les classes réelles et virtuelles sont donc équivalentes. Il y a donc deux comportements de conduite. Le premier est un comportement calme avec un nombre limité de mouvements du joystick à faible vitesse. L'autre correspond à un comportement plus agressif.

Malgré cela, deux des utilisateurs (UE7 et UE9) ont changé de comportement entre la conduite en situation réelle et virtuelle. Le passage de la situation réelle à la situation virtuelle les ont fait passer d'une classe de comportement à l'autre. Ce qui est intéressant dans le cas présent est qu'ils n'ont pas créé un troisième comportement de conduite. Ils sont passés d'un comportement de conduite souple à un comportement de conduite agressif ou vice versa. Nous y voyons un facteur de stress vis à vis

de la plateforme. Dans le premier cas, l'utilisation de la plateforme permet de conduire un fauteuil roulant sans trop se soucier d'éventuelles conséquences par rapport à la vie réelle. Dans l'autre cas, le sujet a acquis une expertise en conduite en fauteuil qu'il ne retrouve pas avec l'utilisation du simulateur qui est vu comme un nouveau système à appréhender. Notre hypothèse est qu'il existe une troisième classe d'utilisateurs sensibles aux changements réel/virtuel. Il est cependant difficile d'établir les effets de cette sensibilité étant donné le nombre restreint de sujets qui ont subi ce changement de comportement.

III. Perception et retours sensoriels

La première expérimentation nous permet d'évaluer l'adéquation de notre plateforme de simulation par rapport à la conduite en fauteuil roulant. Avec une configuration minimale de la plateforme, l'analyse des actions du joystick dans le cadre de la conduite en fauteuil roulant électrique nous permet d'extraire deux comportements de conduite. Le premier est un comportement calme avec un nombre limité de mouvements du joystick à faible vitesse. L'autre correspond à un comportement plus agressif. Nous retrouvons ces deux comportements en situation réelle et en situation virtuelle. Un certain nombre d'utilisateurs changent de comportement entre les deux situations. Notre hypothèse concernant ces utilisateurs est qu'ils sont sensibles au changement réel/virtuel.

Les résultats actuels nous laissent penser, en première hypothèse, que le comportement des utilisateurs de la plateforme est proche en simulation de la situation réelle. Il est donc nécessaire de leur fournir une expérience virtuelle plus immersive et réaliste. Des retours sensoriels adaptés à la tâche et à l'utilisateur sont nécessaires. Ils ne doivent pas perturber l'utilisateur.

Nos essais étant réalisés sur sol plat, nous n'avons pas activé l'interface kinesthésique de notre plateforme. On peut toutefois se demander si l'ajout de cette interface lors d'une simulation, améliore la perception par l'utilisateur de son environnement.

Une deuxième expérimentation a donc été menée dans le cadre de Laval Virtual 2011 (Figure 37) afin d'évaluer l'apport de l'interface kinesthésique dans la perception de l'utilisateur. Autrement dit : la sensation de mouvement du corps est-elle importante pour la perception du mouvement lors d'une simulation dans un monde virtuel ?



Figure 37 : La plateforme robotique au salon Laval Virtual 2011

Durant cette expérimentation, le sujet est placé sur notre simulateur. Celui-ci est composé d'une scène virtuelle et de notre plateforme robotique. La plateforme utilise une interface de visualisation (un écran de projection de 2mx1m placé à environ 1m50 du sujet) et une interface kinesthésique (un système de mouvement à quatre vérins).

1. Parcours de test

Le sujet doit piloter un fauteuil roulant électrique virtuel à l'aide d'un joystick. Les éléments de la scène contiennent des textures rendant ainsi la mise en situation visuellement plus réaliste. La texture du sol possède un motif avec des carreaux afin de fournir au sujet une indication sur sa vitesse et sa direction. Elle est de couleur unie afin que le sujet ne puisse pas facilement repérer quel type d'étape franchie. Nous souhaitons que le sujet se fonde sur la sensation de mouvement (qu'elle soit provoquée par le défilement de l'image ou le système de mouvement) pour faire son choix.

Le parcours est une combinaison aléatoire de 7 étapes caractéristiques (Figure 38) :

- Etape 1. Plat
- Etape 2. Pente montante de 10%
- Etape 3. Pente descendante de 10%
- Etape 4. Montée de marche de 5cm
- Etape 5. Descente de marche de 5cm
- Etape 6. Devers à droite de 5%
- Etape 7. Devers à gauche de 5%

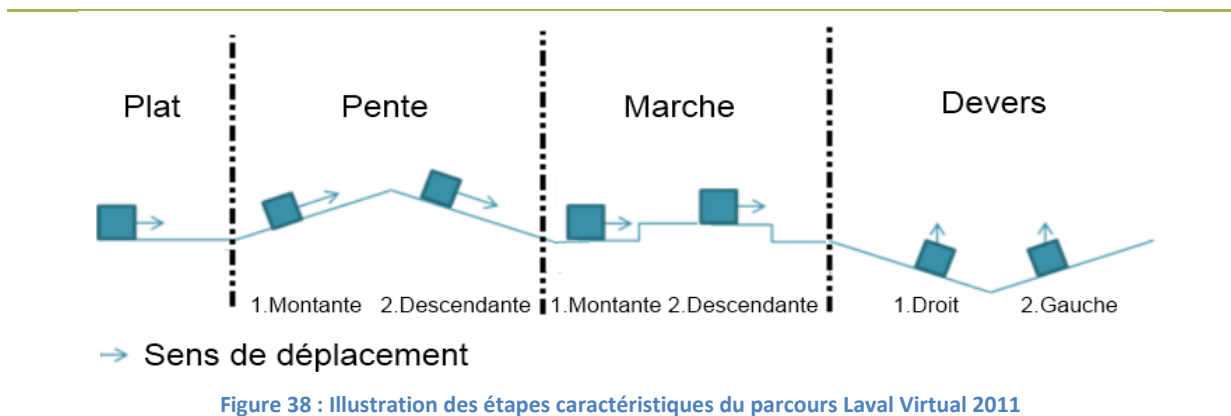


Figure 38 : Illustration des étapes caractéristiques du parcours Laval Virtual 2011

Chaque étape provoque une situation différente vis à vis du fauteuil virtuel et donc du système de mouvement. Chaque étape apparaît aléatoirement deux fois dans le parcours. Au total, le parcours est donc composé de 14 étapes. Chaque étape est précédée par une « zone de repos » qui est en fait une zone plate. Lorsque le sujet arrive à une « zone de repos » après avoir franchi une étape, il doit s'arrêter et énoncer à haute voix le type d'étape qu'il pense avoir franchi. Ces réponses sont notées et comparées à la liste d'étape du parcours.

Ce procédé est répété trois fois avec une configuration de perceptions différentes et agencées aléatoirement :

1. un parcours dynamique où l'utilisateur ne réagit qu'à l'interface kinesthésique (parcours Dynamique),
2. un parcours visuel où l'utilisateur ne possède que la visualisation (parcours Visuel). Dans ce cas, une tierce personne pilote le fauteuil à la place du sujet et lui demande l'étape franchie à chaque « zone de repos ».
3. un parcours complet où les deux interfaces sont actives (parcours Complet)

2. Simulation et retours sensoriels

Pour piloter le fauteuil roulant virtuel, le sujet utilise une caméra de type « première personne ». Ainsi, la caméra suit le déplacement du fauteuil lors des différentes étapes. Avec le parcours Visuel, le déplacement de la caméra permet d'identifier le mouvement du fauteuil.

Lorsque le système de mouvement est activé, il est commandé par l'orientation du fauteuil roulant virtuel par rapport à l'horizontale. Il est donc important que les mouvements du fauteuil roulant virtuel soient les plus réalistes possible afin que les mouvements induits par la plateforme le soient tout autant. Le fauteuil et l'environnement sont donc physicalisés.

Chaque vérin du système de mouvement utilisé peut effectuer une course de 4 cm maximum. Le positionnement des vérins aux extrémités de la plateforme nous permet d'effectuer des inclinaisons d'environ 4%. Nous ne pouvons donc pas simuler des pentes de 5% et 10% définies dans nos étapes. Nous définissons la commande des vérins de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{mouvement} = \frac{\theta_{fauteuil}}{10} \text{ quand } \theta_{fauteuil} \leq 10 \\ C_{mouvement} = 10 \text{ quand } \theta_{fauteuil} > 10 \\ C_{mouvement} = -10 \text{ quand } \theta_{fauteuil} < -10 \end{array} \right.$$

Où :

- $C_{mouvement}$ correspond à la commande de la plateforme ; $-1 \leq C_{mouvement} \leq 1$;
- $\theta_{fauteuil}$ correspond à l'orientation du fauteuil selon un plan exprimé en % ;

Ainsi, l'orientation de la plateforme de mouvement est proportionnelle à l'orientation du fauteuil virtuel. L'inclinaison maximum de notre environnement correspond à l'orientation maximum de notre plateforme de mouvement.

3. Population

Un panel de 21 utilisateurs a passé ce protocole. L'âge de la population est compris entre 17 et 70 ans. Nous avons donc proposé un questionnaire sur la base de configuration de perception (Tableau 6).

Tableau 6 : Répartition des personnes selon la configuration de perception (D = parcours Dynamique, V = parcours Visuel, C = parcours Complet)

Combinaison	DVC	DCV	VCD	VDC	CDV
Population	11	5	3	1	2

Pour l'analyse de résultats, nous avons réparti la population entre les utilisateurs ayant eu une expérience de simulation antérieure (jeu vidéo ou simulateur industriel).

4. Résultats

Si on considère la moyenne d'erreur pour le parcours dynamique (Tableau 7 et Tableau 8), nous constatons que la population initiée au simulateur et/ou aux jeux vidéo commet moins de fautes que

la population de non-initiés. Le groupe de non-initiés commet en moyenne 3.18 erreurs tandis que le groupe d'initiés n'en commet que 1.6.

En revanche, les deux groupes perçoivent les mouvements du fauteuil de la même manière avec une simple interface de visualisation. Les deux moyennes pour ce parcours étant très proches.

Tableau 7 : Moyenne d'erreur sur la population initiée à la pratique d'un simulateur (10 personnes)

Configuration	Dynamique	Visuel	Complet	Total
Moyenne	1.6	2.3	1.2	5.1
Ecart-type	1.776	1.889	1.135	2.767

Tableau 8 : Moyenne d'erreur sur la population non initiée à la pratique d'un simulateur (11 personnes)

Configuration	Dynamique	Visuel	Complet	Total
Moyenne	3.18	2.18	2	7.36
Ecart-type	3.219	1.721	1.897	6.265

La dispersion des valeurs est diminuée comme le montrent les écarts type respectifs (3.22 pour le premier groupe et 1.78 pour le deuxième). L'utilisation régulière de jeu vidéo ou la pratique occasionnelle d'un simulateur industriel favorise la perception du mouvement du fauteuil virtuel au travers de notre interface kinesthésique.

Ce qui est intéressant dans les résultats est que l'utilisation de la dynamique seule semble perturber le groupe de non-initiés. Ils ont commis plus d'erreurs avec la dynamique seule qu'avec la visualisation seule. En revanche, il se produit le phénomène inverse pour le groupe d'initiés. Ils commettent moins d'erreurs avec le mouvement qu'avec la visualisation.

Lorsque l'utilisateur se déplace à l'aide des deux interfaces d'interaction, il semble faire moins d'erreurs qu'avec une seule interface. On constate, dans les deux cas, des résultats plus satisfaisants pour le parcours complet dans les deux populations. Par exemple, dans (Tableau 7), la moyenne d'erreur est de 1.2 pour un parcours complet (C) contre 1.6 pour un parcours dynamique (D) et 2.3 pour un parcours visuel (V). Même si la perception de mouvement seul peut poser souci, le couplage des deux interfaces améliore la perception des déplacements de l'utilisateur dans la scène virtuelle.

IV. Synthèse

Les objectifs de notre EV sont l'évaluation de l'environnement au travers de l'accessibilité et l'entraînement à la conduite en fauteuil. Ces objectifs demandent de valider la transposition de connaissance et le réalisme des retours sensoriels. Pour cela nous avons mené deux expérimentations.

Une première étude porte sur l'analyse de comportement de conduite en fauteuil roulant. La seconde concerne l'impact des différents retours sensoriels sur la perception de mouvement dans le monde virtuel.

L'analyse de comportement est basée sur la comparaison de performances de conduite d'un sujet à l'aide de méthode de classification par rapport à une base de comportements de référence issue d'experts dans le domaine. Cette base peut être enrichie avec de nouveaux sujets devenus experts afin de fournir les comportements les plus pertinents.

Cette évaluation dans un parcours réel a permis d'identifier deux classes classiques de comportement de conduite en fauteuil roulant : une conduite qualifiée de « souple » et une conduite « dynamique ». Ces comportements sont basés sur des indicateurs issus des actions joystick durant la réalisation du parcours. La même évaluation sur le même parcours simulé dans un EV a permis d'identifier deux classes de comportement. La comparaison des classes de comportement en situation réelle et virtuelle montre que ces classes sont identiques. Dans sa configuration minimale, l'utilisation de notre simulateur n'engendre pas de nouveaux comportements de conduite. Il a donc un impact faible au regard des actions joystick.

Cependant, certains sujets ont changé de classe de comportement entre parcours réel et virtuel. Il y a donc des personnes sensibles au changement de parcours. Les effets de cette sensibilité sont difficiles à établir mais le fait est que la configuration de la plateforme utilisée est insuffisante.

La deuxième expérimentation a permis de montrer que la perception de mouvement dans la scène virtuelle dépend de la configuration de la plateforme choisie. Elle peut être améliorée à l'aide d'un système de mouvement. Cet impact dépend également de l'expérience préalable du sujet. En effet, les sujets initiés aux simulateurs et aux jeux vidéo ont une meilleure perception kinesthésique. Ils ont donc une meilleure évaluation de l'état du fauteuil roulant virtuel.

La limite de ces deux expérimentations reste l'individu. En effet, c'est l'expérience de l'individu concerné qui détermine son comportement de conduite au travers de la simulation. C'est encore son expérience face au simulateur qui influence sa capacité à utiliser son système kinesthésique afin d'évaluer l'état de son avatar dans le monde virtuel. La configuration de l'EV dépend donc des objectifs de l'utilisateur et également de ses préférences et de sa sensibilité. Des études spécifiques sont à mener afin d'adapter la configuration de la plateforme en fonction des paramètres utilisateurs.

L'un des problèmes avec l'utilisation d'un simulateur se situe dans la transmission d'informations entre la simulation 3D et l'utilisateur via les interfaces de retours sensoriels. En effet, si on reprend le

schéma fonctionnel d'un simulateur (Figure 4) en détaillant chaque bloc, on obtient le schéma suivant :

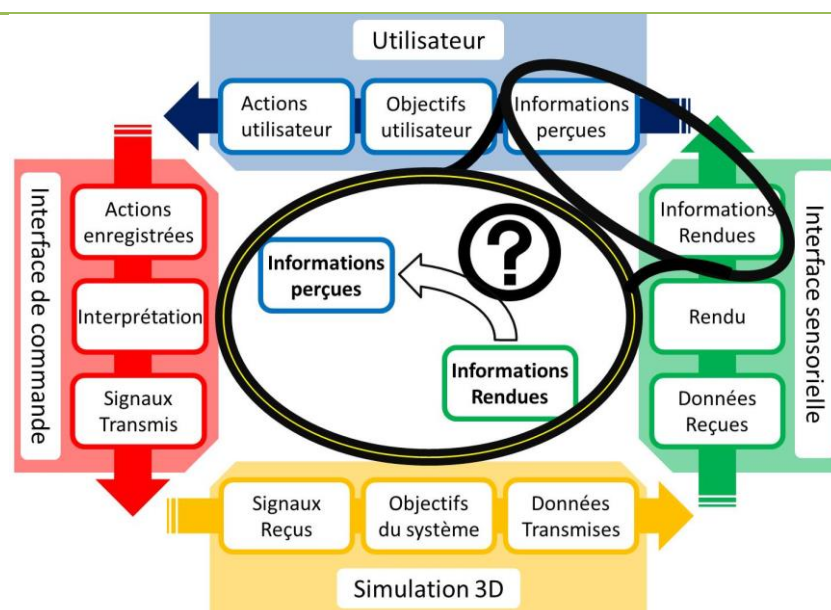


Figure 39 : Schéma fonctionnel détaillé d'un simulateur

Rappelons que dans ce schéma, la simulation 3D renvoie à l'utilisateur les informations concernant le monde virtuel ainsi que l'état de son avatar. Les informations rendues par la simulation vont influencer sur la perception de l'utilisateur du monde virtuel et a fortiori son comportement face à la situation simulée par le simulateur.

Le réalisme correspond à la capacité de voir la réalité. Cela correspond à évaluer l'exactitude des informations transmises à l'utilisateur et à les comparer au réel. Le réalisme peut s'évaluer sur plusieurs niveaux. Le niveau de réalisme le plus couramment utilisé est le réalisme de visualisation (graphique). Augmenter le réalisme graphique consiste à ajuster les couleurs et les formes du monde 3D afin de représenter des objets les plus proches de la réalité. On peut également parler de réalisme comportemental. Dans ce cas, on va faire en sorte que les comportements des objets entre eux et/ou avec l'utilisateur soient les plus cohérents possible en comparaison aux comportements que l'on peut trouver en réel.

Nous définissons le réalisme comme la bonne transmission d'informations du monde virtuel vers l'utilisateur. Une information jugée réaliste ne consiste pas forcément en une information (issue d'une simulation) qui soit la plus proche possible de la réalité mais en une information qui, de quelque nature que ce soit, soit correctement interprétée par l'utilisateur. Il s'agit donc d'adapter le réalisme des retours sensoriels envoyés à l'utilisateur en comparaison aux informations perçues ou interprétées par le même utilisateur.

Nous avons vu que notre simulateur, dans sa configuration minimale, n'induit pas de création de nouveaux comportements de conduite par rapport à une conduite en situation réelle. De plus, nous avons vu que la perception d'informations via des retours sensoriels dépendait de la configuration du simulateur mais aussi de l'expérience préalable de l'utilisateur.

Dans cette thèse nous nous concentrons sur le réalisme sensoriel. Nous étudierons le réalisme des retours sensoriels que peut transmettre notre plateforme robotique. Notre objectif est de proposer un modèle d'adaptation des retours sensoriels permettant de préconiser et de configurer les simulateurs en fonction de l'utilisateur. Pour réaliser cela, nous proposons une première étape vers le modèle d'adaptation des retours sensoriels. Elle consiste à étudier les retours sensoriels séparément et plus particulièrement les retours haptiques et visuels (Figure 40). Dans le cas des retours haptiques, nous concentrerons notre étude sur les phénomènes kinesthésiques induits par la plateforme.

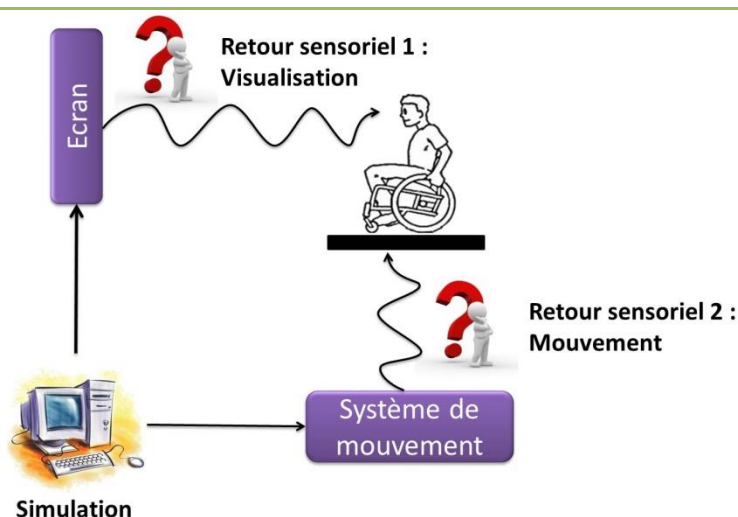


Figure 40 : retours sensoriels étudiés

Nous proposons deux modèles d'adaptation de réalisme ; un pour chaque retour sensoriel utilisé. Pour chacun des retours sensoriels, et de manière indépendante, nous proposons d'évaluer l'effet sur l'utilisateur. Cela correspond à déterminer si l'information est bien perçue et que le comportement est cohérent face à ses retours. A partir de là, nous proposons un modèle permettant de personnaliser le retour sensoriel en fonction de différents critères issus de l'évaluation.

Dans les chapitres suivants, nous allons donc évaluer le réalisme de deux types d'information de manière indépendante. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'utilisation du mouvement lors d'une simulation. Au travers du ressenti des utilisateurs, nous évaluerons si l'utilisation de mouvement participe à la perception de l'environnement. Puis nous étudierons la reproduction du mouvement d'un fauteuil roulant lors d'une situation spécifique afin d'évaluer les performances de notre simulateur.

Ensuite, nous nous intéresserons à la visualisation. Nous étudierons l'impact de différentes configurations de visualisation en fonction de l'environnement rencontré. Nous évaluerons l'impact du changement de visualisation sur le comportement de conduite d'un utilisateur au travers de sa trajectoire.

Chapitre 5

Adaptation des retours haptiques

Le premier retour sensoriel auquel nous allons nous intéresser est l'haptique et les phénomènes kinesthésiques. En fonction du type de sol et du parcours à réaliser, l'utilisateur de fauteuil roulant peut ressentir différentes amplitudes de mouvement dues à son déplacement. Si le parcours est un sol plat entièrement pavé, le fauteuil tremblera tout au long du déplacement. Cela peut devenir inconfortable pour l'utilisateur de fauteuil roulant.

Les systèmes de mouvement permettent de reproduire le mouvement selon différents degrés de liberté. Encore faut-il que ces systèmes puissent simuler tous les mouvements impliqués dans le déplacement en fauteuil roulant.

Notre objectif est donc d'étudier les effets des retours haptiques lors de tâches de déplacement afin de proposer un modèle de configuration des retours haptiques (Goncalves et al., 2014a) (Goncalves, Trenoras, Monacelli, & Schmid, 2014b).

I. Démarche

Nous proposons d'évaluer et d'adapter les retours haptiques en proposant une démarche en trois étapes.

Dans un premier temps, nous évaluons les performances de notre système de mouvement pour reproduire les mouvements d'un fauteuil roulant électrique malgré les limitations techniques. Ce pré-test consiste à simuler le déplacement d'un fauteuil roulant dans un cas spécifique : la descente de marches. Parmi toutes les étapes figurant dans le Wheelchair Skills Training Program (Routhier et al., 2012), descendre une marche peut engendrer des mouvements violents selon la hauteur considérée. Ce mouvement peut être utile pour évaluer les performances de la plateforme dans ses limites d'utilisation. Il permet ainsi d'évaluer le seuil de mouvement acceptable pour un utilisateur.

A l'aide de données inertielles (accélération et vitesse du fauteuil roulant), nous pouvons comparer le mouvement du fauteuil en situations réelle et virtuelle. Nous établirons ainsi dans quelle mesure le système de mouvement est fiable. De plus, nous évaluons le ressenti des différents utilisateurs lors de la descente de marche en situations réelle et virtuelle. En comparant le ressenti par rapport aux deux situations, l'utilisateur peut ainsi évaluer le réalisme de la simulation proposée.

Ensuite, nous évaluerons l'effet d'une première adaptation du mouvement. Nous verrons dans quelle mesure l'accélération joue un rôle dans le ressenti de la descente de marche.

Enfin, nous proposerons une méthodologie d'adaptation du retour haptique basée sur les évaluations précédentes. Cette méthodologie permet d'adapter le comportement de la plateforme de mouvement en fonction de l'utilisateur.

Protocole Etape 1 :

La première phase du protocole consiste à évaluer les performances du système de mouvement. Nous disposons d'un système de capture de mouvement (de type centrale inertielle) installé sur le fauteuil roulant. Nous recueillons les données sur la dynamique du fauteuil durant la descente de trois hauteurs de marche différentes en situation réelle. Nous reproduisons le mouvement sur la plateforme robotique. Ensuite, nous comparons les deux situations en analysant les courbes d'accélération et de vitesse fournies par la centrale inertielle lors de la descente de marche avec le fauteuil.

Quatre personnes ont effectué le test dans cette pré-étude :

- 2 personnes valides ;
- 1 ergonome (personne valide, expert en conduite en fauteuil) ;
- 1 UFR (personne avec une paraplégie, expert).

Chaque personne correspond à un profil utilisateur spécifique du projet. Les deux personnes valides correspondent à l'objectif de sensibilisation, l'ergonome au diagnostic et l'UFR à l'entraînement. Notre objectif est de réaliser une première démonstration des caractéristiques de la plateforme afin d'illustrer les besoins et spécificités des utilisateurs finaux. A la fin du test, nous demandons à chaque utilisateur de classer les niveaux de marche du plus réaliste au moins réaliste. Autrement dit, nous

leur demandons de comparer chaque niveau virtuel vis-à-vis de sa marche réelle associée et d'établir un classement.

Protocole Etape 2 :

Dans la seconde phase, nous analysons l'effet de l'accélération dans le ressenti du mouvement sur la plateforme robotique. Pour cela, nous allons moduler l'accélération lors de la descente d'une marche de hauteur fixe. Ceci nous permettra de simuler trois hauteurs de marche virtuelle en jouant uniquement sur l'accélération lors du mouvement.

Nous prenons comme référence une des hauteurs de marche déterminée lors de l'étape 1. Nous définissons cette marche comme ayant une dynamique moyenne. Nous simulons une marche de dynamique « faible » et « forte » en appliquant un coefficient à l'accélération de la marche « moyenne ». Nous obtenons ainsi trois marches virtuelles de hauteur différentes par simple adaptation de l'accélération.

Dix sujets ont effectué ce second test :

- 5 novices en conduite de fauteuil ;
- 5 experts (personnes valides ayant une expérience de la conduite en fauteuil roulant).

Dans cette phase, chaque sujet expérimente deux fois de suite chaque marche dans un ordre aléatoire. Nous demandons aux sujets de distinguer trois niveaux de dynamique et comment ils interprètent ces derniers. Autrement dit, nous évaluons si une adaptation de l'accélération peut être interprétée comme l'adaptation des hauteurs de descente de marche ou non.

1. Système de capture de mouvement

Nous avons utilisé un système de capture de mouvement (de type centrale inertielle) développé au laboratoire LISV pour mesurer les mouvements du fauteuil. Ce système de capture utilise un couple de capteurs accéléromètre/gyromètre. (Aminian & Najafi, 2004) et (Sakaguchi, Kanamori, Katayose, Sato, & Inokuchi, 1996) montrent que des accéléromètres et des gyromètres sont suffisants pour la capture de mouvement en temps réel. Pour chaque couple, l'accéléromètre donne l'accélération linéaire selon les trois axes (jusqu'à $3\text{ g} \approx 29.4\text{ m.s}^{-2}$) et le gyromètre donne la vitesse angulaire (jusqu'à $120^\circ.\text{s}^{-1}$).

Dans cette expérimentation, nous nous concentrons sur l'accélération selon l'axe z (translation haut/bas) et sur la vitesse angulaire autour de l'axe y (rotation avant/arrière). Ce sont les seules composantes dynamiques qui entrent en jeu lors d'une simulation de descente de marche sur notre plateforme de mouvement. En effet, nous ne pouvons réaliser de translations avant du fauteuil sur notre plateforme. De plus, nous simulons une descente de marche de face. Les rotations à gauche /à droite sont donc négligées.

2. Contrôle du mouvement

Pour le test des effets sur le fauteuil roulant, nous décomposons le mouvement en plusieurs phases successives. Ainsi, une phase est définie comme l'intervalle de temps durant lequel l'ordre (positif, négatif ou nul) de toutes les composantes du mouvement est constant. Le mouvement d'un fauteuil roulant descendant une marche peut être décomposé en trois phases (Figure 41).



Figure 41 : Décomposition du mouvement en phases

Dans ce cas précis, seules deux composantes sont reproductibles avec la plateforme : la rotation avant/arrière ($\vec{\omega}_y$) et la translation haut/bas (\vec{a}_z). La phase A ne génère qu'une translation avant qui n'est pas pertinente de reproduire sur la plateforme. Nous avons donc reproduit seulement le mouvement des deux autres phases pour la translation et la rotation.

La commande de notre système de mouvement est en deux parties : position et dynamique. La commande en position est un vecteur de trois valeurs régissant le roulis (*Roll*), le tangage (*Pitch*) et la levée (*Heave*) de la plateforme. Chaque composante possède une valeur comprise entre 0 et 1000 (0 étant le minimum, 1000 le maximum et 500 la valeur neutre). La commande en position permet de commander les phases du mouvement ainsi que la hauteur de marche descendue par la plateforme. La fréquence de commande détermine la fréquence de phase.

En parallèle de la commande en position, nous pouvons configurer la dynamique des actionneurs (et donc de la plateforme). Le système de mouvement permet de gérer l'accélération et la décélération des actionneurs ainsi que leur vitesse maximum. Nous pouvons ainsi configurer la dynamique de la plateforme. Dans notre cas, nous ne pouvons pas modifier ces valeurs pendant un mouvement. Ces valeurs sont transmises au système de commande à l'initialisation et restent invariables durant la durée de fonctionnement du système de mouvement.

Le système de mouvement est capable d'interpréter les commandes avec les valeurs maximum (0 et 1000) jusqu'à 10 Hz. (Cooper et al., 2003) montre que le risque de blessures apparaît pour des oscillations entre 4 et 15 Hz. Dans notre essai, les sujets descendent une marche à la fois avec un temps de repos entre chaque passage. Le fauteuil est poussé par un intervenant à faible vitesse. Nous avons établi la fréquence de phase lors de nos simulations à 2Hz.

Afin de commander notre PR, nous proposons une commande à l'aide de la matrice suivante :

$$C_{marche} = K \begin{pmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,1} & R_{2,2} \end{pmatrix}_{[h]} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\omega}_y \\ \vec{a}_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

Où :

- K correspond à un coefficient de modulation globale;
- $R_{i,i}$ sont les éléments de la matrice de commande pour la dynamique;
- h correspond à la hauteur de marche en cm à descendre;

Chaque élément du vecteur C_{marche} correspond à une phase du mouvement composée d'une translation et d'une rotation. La matrice R est la matrice des amplitudes du mouvement. $R_{1,1}$ et $R_{1,2}$ sont les vitesses angulaires et accélérations linéaires de la phase Pb. $R_{2,1}$ et $R_{2,2}$ sont les mêmes composantes durant la phase Pc.

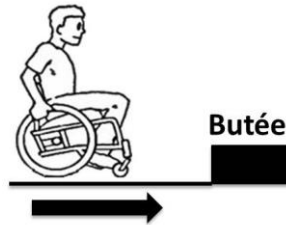
L'intérêt de ce modèle est la modulation de chaque effet de deux façons différentes : globale et interne. La modulation globale correspond à l'équation (12) présentée précédemment. Le gain global K permet d'ajuster le paramètre de la matrice R . Le coefficient K affecte ainsi toutes les composantes du mouvement de manière uniforme. Elle permet de traduire une modification globale du mouvement telle que le changement de hauteur de marche dans notre cas.

La modulation interne correspond à moduler les paramètres de la matrice indépendamment. Cela revient à affecter un coefficient $K_{i,i}$ à chaque élément de R .

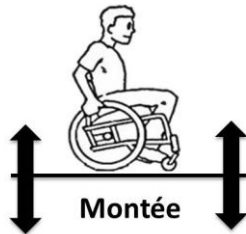
$$C_{marche} = \begin{pmatrix} K_{1,1} \cdot R_{1,1} & K_{1,2} \cdot R_{1,2} \\ K_{2,1} \cdot R_{2,1} & K_{2,2} \cdot R_{2,2} \end{pmatrix}_{[h]} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\omega_y} \\ \vec{a_z} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Les coefficients $K_{i,i}$ peuvent augmenter ou diminuer indépendamment les phases et les composantes du mouvement en fonction de l'utilisateur et de la tâche à réaliser. Ainsi, la commande devient adaptable. La longueur du fauteuil, la vitesse et l'interprétation des retours vestibulaires sont modifiées par les valeurs de la matrice R et les valeurs de modulation K associées.

D'autres situations comme l'arrêt en butée (14) ou la montée verticale (15) peuvent aussi s'exprimer par cette matrice :



$$R_{arrêt} = \begin{pmatrix} R_{1,1} & 0 \\ R_{2,1} & 0 \end{pmatrix}_{[h]} \quad (14)$$



$$R_{montée} = \begin{pmatrix} 0 & R_{1,1} \\ 0 & R_{2,1} \end{pmatrix}_{[h]} \quad (15)$$

3. Marche virtuelle et réelle

Le test de marche en situation réelle a été réalisé sur une Plateforme de Test (PT). Elle est composée de deux panneaux horizontaux adjacents d'approximativement 2 m par 2 m chacun. Le panneau supérieur est fixe tandis que la hauteur du panneau inférieur peut être modifiée à l'aide d'une manivelle. Les sujets commencent le test sur le panneau supérieur.



Figure 42 : Plateforme de test (PT) en situation réelle



Figure 43 : Plateforme robotique (PR) utilisée pour la situation virtuelle

Etape 1 :

Le test de marche en situation virtuelle a été réalisé sur la plateforme PR sans usage de la visualisation. Nous avons demandé aux utilisateurs de prendre une posture naturelle sur le fauteuil. Un assistant pousse le fauteuil vers le plan inférieur pour descendre la marche pour les tests en réel.

Les sujets ont passé le test avec les yeux fermés pour éviter toute prédiction et interprétation du mouvement à l'aide de la vision. Cela oblige les sujets à se reposer sur leurs sensations vestibulaires pour comparer les effets entre situation réelle et virtuelle. En environnement intérieur et extérieur, les marches ont une hauteur moyenne de 12 cm. De plus, plusieurs programmes d'entraînement tel que le W au fauteuil roulant incluent des exercices de franchissement de marche de 5, 10 et 15 cm. Les limitations mécaniques de la plateforme, dans sa version actuelle, nous empêchent de recréer une marche de 10 cm. Ainsi, les sujets ont descendu une marche de 3, 5, et 7 cm en situation réelle qu'ils ont comparée à 3 configurations de la plateforme virtuelle. Chaque sujet franchit 10 fois chaque hauteur de test.

Tableau 9 : Configurations de marche choisies pour la première phase

Hauteur marche (réelle)	3 cm	5 cm	7 cm
Hauteur marche (plateforme)	1.6 cm	3.1 cm	4 cm
Accélération verticale normalisée	1	2.41	3.81
Itérations	10	10	10

Les configurations de marche choisies font logiquement varier la hauteur réellement descendue lors de la simulation sur PR mais également l'accélération du mouvement. Or, la différence de hauteur n'est pas pertinente car l'oreille interne et les autres mécanismes de perceptions associées sont sensibles aux accélérations et au jerk et non à la position. En suivant ce principe, cela implique que la hauteur de marche sur PR n'a pas besoin d'être identique à la hauteur de marche sur PT.

Etape 2 :

Nous désirons valider l'hypothèse suivante : la différence de hauteur de marche entre la situation réelle et virtuelle peut être compensée par l'inertie du mouvement lors de la descente.

Nous décidons de simuler trois hauteurs de marche différentes en ne jouant que sur l'accélération du mouvement.

Tableau 10 : Configurations de marche choisies pour la seconde phase

Dynamisme de la marche	Bas	Moyen	Haut
Accélération verticale normalisée	0.5	1	2
Itérations	2	2	2

Dans le test de la seconde phase, nous prenons comme référence la marche de 3 cm dont nous modulons l'accélération. La modulation que nous avons choisie introduit un coefficient de modulation pour créer une marche dynamique « forte » et une marche de dynamique « faible ». Les valeurs des coefficients de ce test ont été arbitrairement choisies afin de simuler une plage de dynamique large. Ceci nous permet d'évaluer les limites de la dynamique de la marche. Chaque sujet passe deux fois chaque niveau de simulation de façon aléatoire.

II. Résultats

Durant cette expérience, nous avons pris en compte trois types différents de données : l'accélération linéaire selon l'axe z (translation haut/bas), et la vitesse angulaire autour de l'axe y (rotation avant/arrière) ainsi que les sensations des sujets.

1. Données inertielles

Nous comparons les données inertielles (accélération et vitesse) entre les situations réelles et virtuelles pour déterminer si la commande appliquée est pertinente.

Le résultat de ces comparaisons est ensuite mis en relation avec les sensations des sujets (questionnaire). L'allure générale de la courbe est la même dans les deux situations (Figure 44).

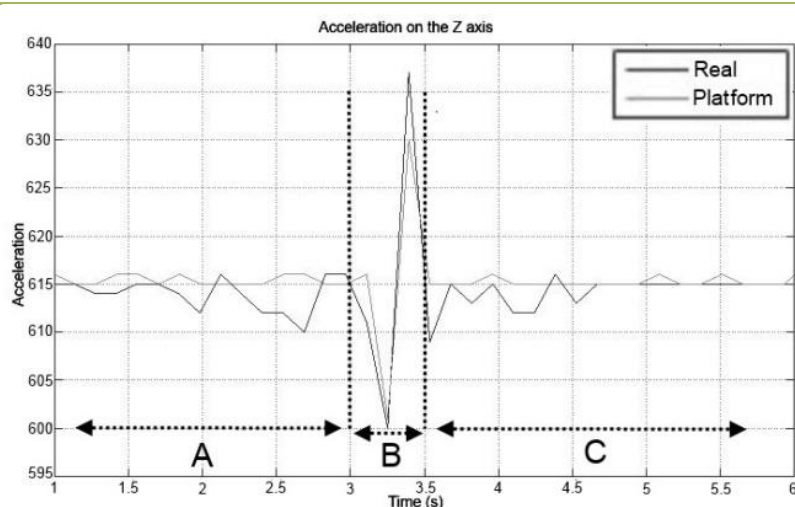


Figure 44 : Accélération pour une marche de 3cm (10 unités correspondent à 1.5 m.s^{-2})

Nous pouvons diviser la courbe d'accélération en trois phases : chacune correspondant à une des trois phases du mouvement :

- A. Une portion plate : l'accélération initiale lors de la poussée de l'assistant;
- B. Un pic négatif : les roues avant descendent la marche;
- C. Un pic positif : les roues arrière et le sujet descendent la marche.

La courbe réelle (Figure 44) montre une phase amortie que la courbe virtuelle ne possède pas. Notre commande modélise implicitement le système fauteuil/utilisateur comme un système entier rigide. C'est une simplification car le fauteuil, les pneus et le corps humain ne sont pas entièrement rigides et constituent un corps complexe avec amortissement. Cela crée la phase d'amortissement observée lors du mouvement réel. En situation virtuelle, le fauteuil est fixé pour des raisons de sécurité. Cela réduit partiellement les mouvements relatifs du fauteuil par rapport à la PR.

Nous trouvons la même décomposition en trois phases : le plat (A), premier pic (B), second pic (C) sur les courbes de vitesses angulaires (Figure 45). L'effet d'amortissement apparaît également pour les mêmes raisons que pour l'accélération.

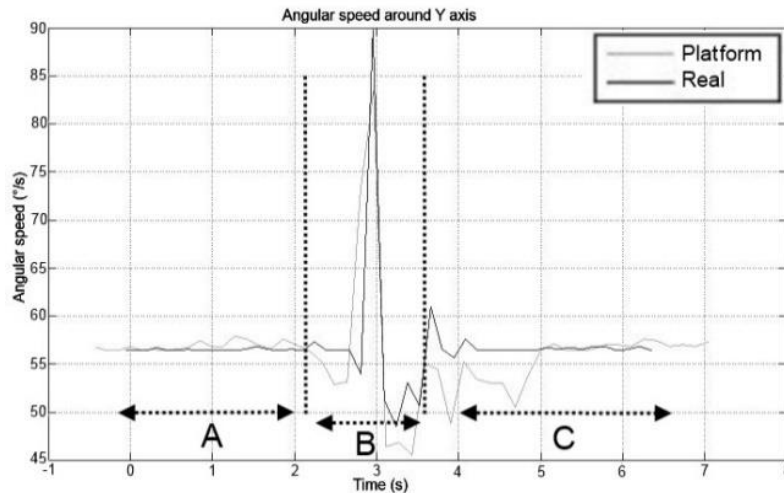


Figure 45 : Vitesse angulaire pour une marche de 7cm (en $^{\circ} \cdot s^{-1}$)

Dans les courbes réelles, il y a toujours un à-coup négatif avant le premier pic. Il correspond à une légère montée des roues avant. Elle est due à l'accélération initiale et à la force appliquée par l'assistant en poussant le fauteuil. Les roues avant subissent une légère hausse par rapport au début du test. Le fait que l'amplitude des pics successifs est différente peut s'expliquer par la distribution de masse sur le fauteuil. La plupart de la masse du système est située vers l'arrière lorsque le sujet est assis. Les roues avant ont moins d'inertie que les roues arrières. De plus, les capteurs sont plus proches des roues arrières. Ce qui explique que l'accélération est plus forte sur les roues arrières.

Les variations observées peuvent être expliquées par deux facteurs. Premièrement, l'assistant ne devait pas lâcher le fauteuil durant le test pour des raisons de sécurité. Cela a un effet en augmentant ou diminuant le mouvement. Ensuite, le sujet interagit avec le fauteuil durant le mouvement. En déplaçant son torse, le sujet change les caractéristiques inertielles du fauteuil. De plus, chaque sujet se comporte de manière différente suite aux perturbations du fauteuil.

Ces résultats montrent que notre plateforme est capable de "reproduire" le mouvement d'un fauteuil roulant descendant une marche. L'amplitude des courbes obtenues en situation réelle et virtuelle est semblable. Nous pouvons identifier, dans les deux cas, les différentes phases du mouvement à partir des courbes. D'un autre côté, nous avons compensé la différence de hauteur entre situation réelle et virtuelle. Les résultats indiquent que le modèle de contrôle que nous avons développé fonctionne. Malgré cela, le facteur déterminant pour évaluer la qualité d'immersion d'un système est le sujet lui-même. Nous devons analyser les perceptions de mouvement de l'utilisateur pour valider l'interprétation des sensations par le sujet.

2. Retours utilisateurs – Etape 1

Tous les sujets ont interprété le mouvement de la plateforme comme une simulation d'une descente de marche. Tous ont pu identifier trois niveaux différents correspondant aux trois hauteurs de marche proposées.

Malgré cela, l'amplitude du mouvement (du point de vue de l'accélération) pose problème. Les quatre sujets ont estimé que le mouvement sur la plateforme est plus violent que le test réel associé. L'ergonome a senti un effet de surprise. En fait, l'assistant pousse le fauteuil roulant durant le test. Le

sujet peut donc prédire quand il doit descendre la marche en se basant uniquement sur les mouvements du fauteuil. La plateforme ne reproduit pas cet effet de poussée. Elle ne reproduit que la descente de marche. Le sujet ne peut donc se préparer et l'effet de surprise peut donc accentuer l'effet de choc.

A la fin des tests, les sujets devaient classer les niveaux de simulation en fonction de leur réalisme en comparaison à la situation réelle associée. Le premier du classement est le niveau dont la situation virtuelle est la plus ressemblante à la situation réelle. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Classement des niveaux par les utilisateurs

Classement	Valide 1	Valide 2	Ergonome	UFR
1	7 cm	7 cm	7 cm	3 cm
2	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
3	3cm	3cm	3cm	7cm

Le Tableau 11 montre qu'il semble y avoir une différence dans l'évaluation des sujets. Les personnes valides ont senti que le niveau le plus pertinent est celui présentant les plus fortes réactions. Une des personnes valides a senti que la simulation de 3 cm équivaut à une marche réelle de 5 cm. Cette différence diminuant avec l'augmentation du niveau. Pour les personnes valides, la simulation de 7 cm est satisfaisante mais un peu trop violente. Un test est prévu avec un groupe plus important dans la suite du projet.

L'UFR a senti les choses différemment. Il a senti que la simulation de marche de 3 cm est vraiment réaliste. Plus le niveau augmente, plus la descente de marche paraissait devenir un choc plus qu'une marche.

Un test sur un nombre aussi restreint de sujets ne permet pas de conclusion générale en fonction du groupe d'utilisateurs. Les conclusions données ne concernent que les personnes ayant réalisé le test. Malgré cela, le test permet d'illustrer le fait que la sensation de mouvement n'est pas unique. Elle est susceptible de changer en fonction des sujets.

3. Retours utilisateurs – Etape2

Dans l'expérience précédente, la simulation de la marche fait varier la dynamique et la hauteur que le sujet descend sur la plateforme robotique. La commande permet de simuler la descente d'une marche. Mais en dépit de cela, les sujets étaient plus sensibles aux chocs que la hauteur réellement descendue.

Pour souligner cela, on module l'accélération de la plateforme robotique lors de la simulation de la descente d'une marche. La même hauteur de 1,6 cm (correspondant à une simulation de marche de 3 cm) est simulée par la plateforme robotique avec trois accélérations différentes. Nous avons d'abord demandé aux sujets s'ils ont distingué trois niveaux d'accélération. Puis nous leur avons demandé si les trois niveaux peuvent être interprétés comme trois hauteurs différentes.

Fort heureusement, tous les sujets ont reconnu trois niveaux différents d'accélération. Ils ont pu identifier chacun d'eux indépendamment de l'ordre d'apparition. En général, ils ont interprété le

mouvement simulé comme différentes hauteurs de marche. La distinction entre les deux groupes se produit lorsque l'on traite de l'interprétation de marches hautes et basses. Selon le groupe auquel ils appartiennent, 40% des sujets ont une interprétation différente du mouvement.

Tableau 12 : Commentaires des sujets à l'étape 2

Sujet	Groupe	Commentaires / interprétation
S1	Novice	Trois marches de hauteurs différentes.
S2	Novice	Trois niveaux différents. La marche faible ressemble à un passage de pente car l'accélération est trop faible.
S3	Novice	Trois marches de hauteurs différentes.
S4	Novice	Trois niveaux différents. La marche faible ressemble à un passage de pente car l'accélération est trop faible.
S5	Novice	Trois niveaux différents. La marche forte ressemble plus à un choc ce qui la rend désagréable.
S6	Expert	Trois marches de hauteurs différentes.
S7	Expert	Trois marches de hauteurs différentes.
S8	Expert	Trois niveaux différents. La vitesse de déplacement est modifiée ; pas la hauteur de marche.
S9	Expert	Trois marches de hauteurs différentes.
S10	Expert	Trois niveaux différents. La vitesse de déplacement est modifiée ; pas la hauteur de marche.

Dans le groupe des novices, deux personnes sur cinq ont confondu le mouvement le plus souple avec une descente de pente. La sensibilité des sujets est différente pour chacun. La différence entre la descente d'une pente et descendre un trottoir est le « choc » de la descente (vers l'avant ou vers l'arrière). L'accélération minimum afin que ce choc soit interprété comme une descente de marche et non comme une descente de pente est dépendant de la sensibilité de chaque sujet.

Dans le groupe d'experts, la modulation d'accélération n'a pas été interprétée comme différentes hauteurs de marche mais comme une modulation de la vitesse du fauteuil roulant. Cela est valable pour deux personnes sur cinq même si l'intervalle de temps entre les phases de mouvement sont les mêmes entre chaque simulation.

III. Adaptation

Les retours sensoriels des sujets semblent montrer qu'il y a besoin d'adapter la loi de commande de la plateforme robotique en fonction de la personne. Il est nécessaire de moduler les effets du mouvement pour corriger les retours vestibulaires des sujets. La modulation du mouvement de la plateforme dépend également de la tâche à accomplir. Lors d'une session d'entraînement, nous pourrions viser une reproduction plus "exacte" du mouvement pour le sujet tandis qu'une expérience telle qu'un choc pourrait être suffisante pour une sensibilisation.

Cette adaptation correspond à une modulation globale des effets du mouvement car seule la hauteur de marche est modifiée dans notre expérimentation. La modulation peut être effectuée par l'application d'un coefficient global K au mouvement. La commande du mouvement modulée peut s'écrire :

$$C_{marche} = K_{hauteur/sujet} \cdot \begin{pmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,1} & R_{2,2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overrightarrow{\omega_y} \\ \overrightarrow{a_z} \end{pmatrix} \quad (16)$$

L'adaptation du coefficient $K_{hauteur/sujet}$ dépend de l'utilisateur et de la tâche à accomplir. Dans notre cas, les premiers retours des sujets ont été recueillis durant une session d'entraînement. La première étape d'identification est de définir le premier rang de hauteur de marche (rang 1 dans le Tableau 11) sur la base des sensations utilisateurs. Puis, une phase d'évaluation modifie les autres hauteurs afin d'obtenir trois niveaux de marche différents s'accordant avec la sensibilité de l'utilisateur. Pour les valides, la hauteur prédéfinie à modifier est une marche de 3 cm. Pour l'UFR, on modifie la marche de 7 cm. En fonction de ces références, l'objectif est de modifier la zone de sensibilité de C_{marche} en utilisant le coefficient K. En conséquence, Figure 46 et Figure 47 montrent des exemples d'accélération modulée.

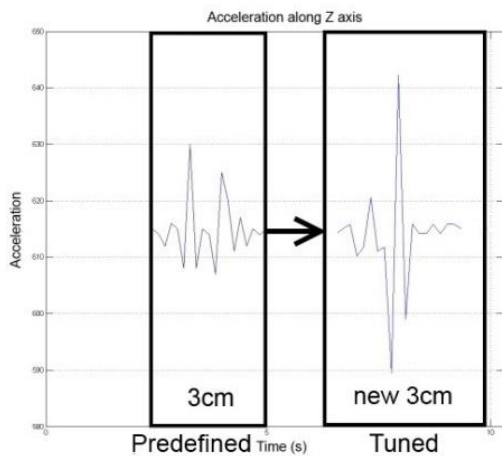


Figure 46 : Exemple de modulation (cas valide)

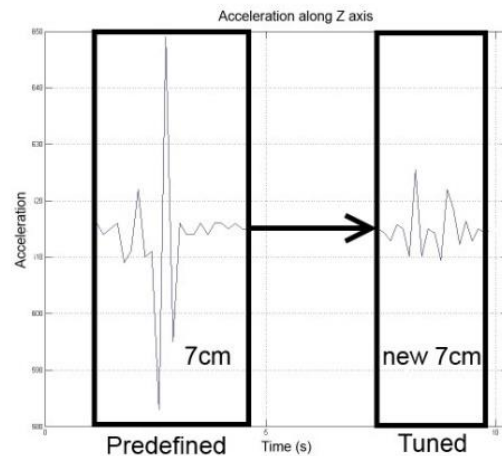


Figure 47 : Exemple de modulation (cas UFR)

A gauche se trouve l'effet de référence. A droite est présenté l'effet modulé. L'adaptation est basée sur une marche de 3 cm pour les personnes valides et de 7 cm pour l'UFR. Les zones de sensibilité sont modifiées de manière globale. Des études montrent qu'environ 70% de notre perception est

visuelle. Les tests ont été réalisés avec des sujets ayant les yeux fermés pour éviter toute interprétation à l'aide de la vision et forcer le sujet à utiliser son système vestibulaire.

Malgré la similarité du mouvement, les retours perçus sont globalement les mêmes pour tous les sujets. Les tests virtuels sont tous plus "violents" que les tests réels. Peut-être l'absence de vision a un effet. Se servir de son système vestibulaire seul pour une personne qui n'y est pas habituée doit créer un sentiment d'appréhension qui exagère les sensations. Le principal problème reste donc l'interprétation du mouvement par l'utilisateur.

Chapitre 6

Adaptation des retours visuels

Pour cette expérimentation, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'immersion visuelle nécessaire à la bonne conduite d'un fauteuil roulant dans un environnement dépend à la fois de la tâche à réaliser et des préférences des utilisateurs mais également de l'encombrement de l'environnement. Autrement dit, en fonction de ces facteurs, il faudra adapter l'immersion visuelle.

Pour cela, nous allons évaluer trois configurations de visualisation de la plus éloignée de l'utilisateur à la plus proche. Avec ces trois configurations de visualisation, nous allons évaluer les trajectoires d'une population dans des situations de conduite en environnements plus ou moins contraints.

I. Configuration de visualisation

L'objectif de cette étude est de proposer un modèle permettant de préconiser une configuration visuelle immersive en fonction de l'objectif utilisateur et de l'encombrement de l'environnement.

Notre hypothèse est que la proximité de la visualisation doit être adaptée en fonction des préférences utilisateurs et des caractéristiques de l'environnement.

Afin de permettre à l'utilisateur de mieux observer l'environnement par rapport au fauteuil, nous pensons qu'il est nécessaire qu'il puisse voir le fauteuil dans son environnement. Pour cela, il existe différentes méthodes. La première est d'excentrer la caméra pour adopter un point de vue à la « troisième personne ». Ainsi, l'utilisateur peut évaluer l'état du fauteuil plus facilement. Cependant, il adopte un point de vue extérieur qui s'oppose à la mise en situation (notamment dans le cadre d'un entraînement). Il n'est pas mis à la place de l'UFR mais à la place d'un spectateur. La deuxième méthode consiste à augmenter l'angle d'ouverture de la caméra virtuelle. Ainsi, avec une même surface de projection, la caméra diffuse un meilleur champ de vision. L'inconvénient majeur est la distorsion de l'image. On observe une minimisation de la scène. La troisième est d'augmenter la surface de projection pour que la quantité d'informations diffusées par la simulation augmente. Cette méthode induit des distorsions de l'image qu'il faut contrôler.

Nous avons vu, dans le chapitre concernant les simulateurs de fauteuil roulant, que le champ de vision est important. Notamment, (Alshaer et al., 2013) montre qu'un écran large (i.e. augmentation du champ de vision horizontal) est préférable pour améliorer les performances de conduite d'un utilisateur et que la stéréoscopie n'est pas un élément important de visualisation.

Il existe différentes solutions technologiques faisant varier le champ de vision de l'utilisateur. Ces solutions vont de l'écran d'ordinateur à la salle de projection immersive. Il existe différentes modalités matérielles permettant de gérer la projection visuelle vers l'utilisateur: Un écran, comme dans le projet MiWe (Archambault et al., 2012) est l'interface basique utilisé par tous les ordinateurs. Cependant elle limite le champ de vision du fait de ces dimensions. (Grychtol et al., 2009) utilise un écran sphérique. Cela permet d'augmenter le champ de vision de l'utilisateur horizontal et vertical. Cependant, l'affichage sur ce type d'interface nécessite un traitement mathématique pouvant déformer l'image et créer de l'inconfort. Des systèmes plus lourds et coûteux tels que différents écrans disposés autour du sujet comme dans le projet Octavis présenté par (Grewe et al., 2013) ou des CAVEs (salle immersive multi projection), permettent d'immerger l'utilisateur grâce à une projection dans différentes directions. Récemment, l'émergence de Head Mounted Display (HMD) (Inman et al., 2011) permet de gérer l'orientation du sujet pour un regard virtuel de 360°.

Notre hypothèse est que le champ de vision offert par le simulateur doit permettre à l'utilisateur d'observer l'environnement proche du fauteuil (voire le fauteuil lui-même) afin d'améliorer ses performances de conduite. Dans ce sens, ce n'est pas le champ de vision horizontal qui est important mais le champ de vision vertical. Nous proposons un modèle de configuration de l'immersion visuelle dans lequel l'immersion visuelle est dépendante de la proximité de l'utilisateur. A partir de la vue de face standard utilisée précédemment, nous allons ajouter de l'information pour l'utilisateur au travers de l'augmentation du champ de vision. C'est à dire : augmenter la surface de projection en ajoutant au système actuel une projection de plus en proche de l'utilisateur (Figure 48) :

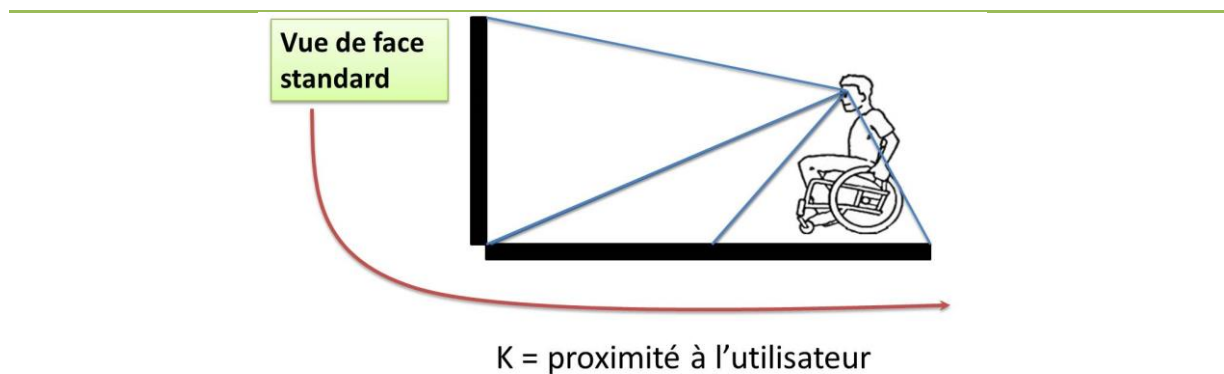


Figure 48 : Modèle de configuration de l'immersion visuelle appliquée au simulateur AccesSim

Dans notre système, la projection de face standard sert de référence. Nous la retrouvons dans toutes les configurations car elle donne à l'utilisateur un repère constant. C'est la configuration de visualisation la plus couramment utilisée dans les jeux et autres applications 3D. Les deux autres configurations sont des combinaisons de la projection de face avec une autre projection plus proche. La surface de projection ainsi ajoutée permet d'intégrer des informations plus ou moins « proche » de l'utilisateur.

Dans cette étude, nous proposons de tester ce modèle avec trois configurations progressives d'immersion (Figure 49) :

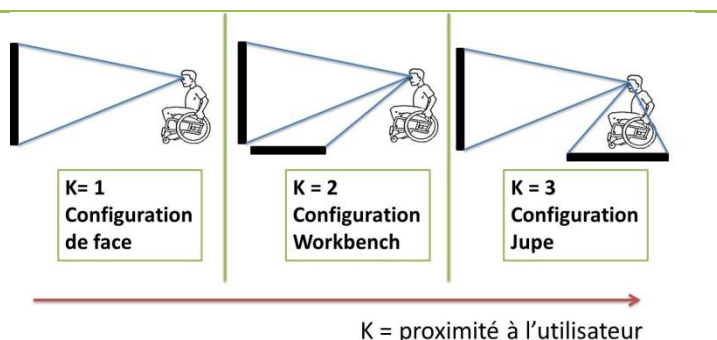


Figure 49 : Schéma des configurations de visualisation sélectionnées



Figure 50 : Illustration 3D des différentes configurations matérielles

Les valeurs de k (allant de 1 à 3) représentent la proximité de la visualisation par rapport à l'utilisateur. Cette proximité de la visualisation est traduite par l'utilisation d'une configuration spécifique de notre système. Donc, chacune des valeurs de k représente une configuration de l'immersion visuelle apportant des informations plus ou moins proches de l'utilisateur et de son fauteuil.

L'objectif de cette étude est de proposer des « règles » permettant de proposer/préconiser la configuration de visualisation adaptée à l'utilisateur. Autrement dit, il s'agit, pour le modèle, de déterminer la valeur de k la plus adaptée en fonction des préférences utilisateurs et de la tâche à accomplir.

Nous nous limitons, dans un premier temps à trois configurations afin de valider notre hypothèse. Nous verrons par la suite (dans la partie Résultats), que d'autres configurations sont possibles. Des combinaisons de configurations seront mentionnées ainsi que l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle (HMD).

II. Configurations de l'immersion visuelle

1. Vue de face(VF)

La vue de face est la vue standard à la « première personne ». Cela correspond à une projection classique sur ordinateur. Elle est pleinement orientée vers l'avant et se focalise peu vers le sol.



Figure 51 : Illustration 3D de la vue de Face



Figure 52 : Un sujet valide devant la vue de face

La projection de la scène virtuelle se fait à 180 cm du sujet. Le projecteur projette sur une surface de 200x150 cm (en format 4/3) à une distance horizontale de 15 cm de l'écran (distance bord du projecteur/bord de l'écran). Le projecteur est situé en bas et à l'arrière de la toile du cadre de projection, posé sur le sol. Le cadre de projection sera descendu au plus bas possible, c'est-à-dire à 35 cm du sol. Ainsi cette projection conservera toujours les mêmes caractéristiques quel que soit le type de projection.

La caméra (virtuelle) associée à cette projection est positionnée à 125 cm à la verticale des yeux du sujet réel. Les angles d'ouverture (FOV) de cette caméra sont de 58.11°x45.24° (en format 4/3) (Surface de 200x150 cm) à 180 cm.

2. Vue Workbench (VW)

En réalité virtuelle, un « Workbench » est un système composé de deux écrans (donc deux projecteurs) perpendiculaires réalisant une stéréoscopie (Figure 53).

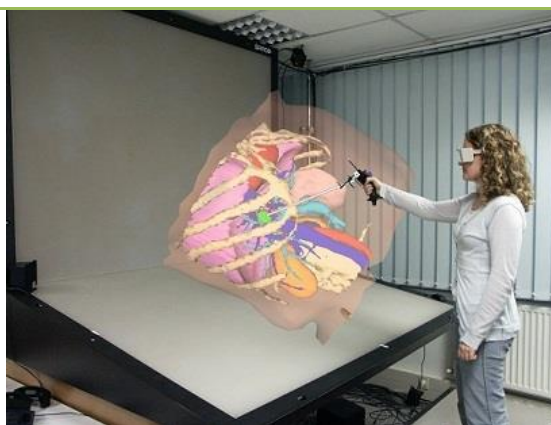


Figure 53 : Exemple de visualisation de type Workbench

Notre vue Workbench est donc basée sur le même principe mais sans la stéréoscopie. Elle permet d'étendre la vue de face standard en ajoutant une vue continue à celle-ci mais plus centrée sur le sol à l'avant du fauteuil. Cette combinaison de projection permet à l'utilisateur d'obtenir des informations plus proches de l'utilisateur qu'une projection standard et plus centrées vers le sol.

Cette visualisation se compose d'une projection face à l'utilisateur (identique à la VF) et d'une projection devant l'utilisateur (comparable à un Workbench). La projection additionnelle se fera sur une planche d'une surface de 200x100 cm. Cette planche se trouve à 35 cm du sol (Elle se trouve à la même hauteur que le bas de l'écran de projection de face). Afin de créer le Workbench, la projection horizontale sera collée et perpendiculaire à la projection verticale.



Figure 54 : Illustration 3D de la vue de type Workbench



Figure 55 : Un UFR électrique devant la vue de type Workbench

Le projecteur sera positionné à 327 cm du sol (292 + 35 cm de la plaque). Le projecteur se trouvera au centre de la surface de projection, soit à 50 cm de la surface verticale de projection. Le projecteur projette sur une surface de 200x107 cm en 16/9 (les 7 cm débordants apparaîtront dans le vide devant le sujet).

La caméra virtuelle associée à cette projection se trouvera à la hauteur du sujet (125 cm). Un angle de -43° est appliqué à la caméra en x afin de simuler la vue basse. Ceci nous permet d'avoir un angle de projection de $58.11^\circ \times 32.69^\circ$.

3. Vue par jupe (VJ)

La vue par Jupe porte son nom par la surface de projection qui se situe tout autour de la personne à l'instar d'une jupe. Elle permet d'étendre la vue de face standard avec une vue centrée sur le sol tout autour du fauteuil. La projection ajoutée permet d'observer l'environnement très proche du fauteuil. La vue par jupe est donc la vue la plus proche de l'utilisateur.

Cette visualisation se compose d'une projection face à l'utilisateur (identique à la VF) et d'une projection autour de l'utilisateur (comparable à une jupe). Le sujet se trouve au centre de la visualisation¹¹. La projection se fera sur une planche d'agglomérée d'une surface de 190x145 cm. Il y aura une surface de 60x95 cm de chaque côté du sujet et une surface de 190x50 cm devant le sujet. Cette planche se trouve à 55 cm du sol et ne sera pas collée à la projection horizontale (projection de face), mais en sera perpendiculaire.

¹¹ Le sujet se trouve dans la visualisation. Mais il y aura plus d'éléments affichés à l'avant qu'à l'arrière.



Figure 56 : Illustration 3D de la vue Jupe

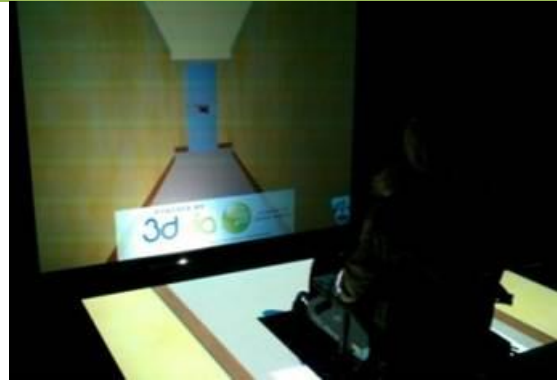


Figure 57 : Un sujet utilisant la vue jupe

Le projecteur sera positionné à une distance 327 cm du sol (272 + 55 cm). Le projecteur affiche sur une surface de 190x119 cm (nous ne projetons que sur 60x69 cm sur les côtés du sujet et nous projetons sur toute la surface devant le sujet (190x50 cm)).

La caméra virtuelle associée à cette projection se trouvera à la hauteur du sujet (125 cm), et à 20 cm de la tête du sujet (vers l'avant). Ceci nous permet d'avoir un angle de projection de 93.73°x67.53°.

4. Caméra virtuelle et champ de vision

Les caméras virtuelles associées à chaque projection présentée suivent l'orientation du fauteuil et non celle de la tête de l'utilisateur. Ainsi la vue est toujours dirigée vers l'avant du fauteuil. Ceci donne à l'utilisateur un repère sur la direction du fauteuil même dans le cas où il ne peut le voir (en vue de face notamment).

De plus, nous voulons que la caméra virtuelle affiche la scène à échelle 1/1. Nous devons alors calculer l'angle d'ouverture de chaque caméra afin que celles-ci affichent la scène telle que l'utilisateur la verrait. La valeur de x_{FOV} (l'angle d'ouverture) se calcule de la façon suivante (Goldstein, 2013), (Gross, Singer, Totzeck, Blechinger, & Achtner, 2005) (Czerwinski, Tan, & Robertson, 2002)

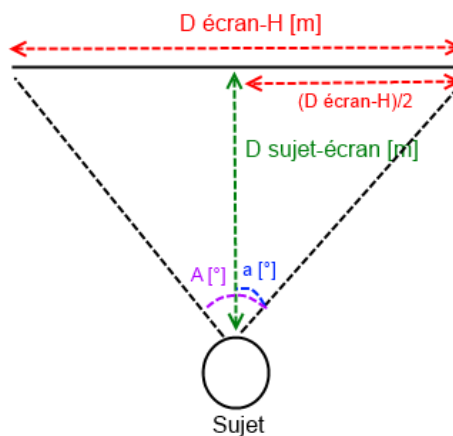


Figure 58 : Représentation du calcul du FOV d'une caméra virtuelle en fonction du sujet

$$A = 2.a = x_{FOV-H} = 2.\tan^{-1}\left(\frac{D_{\text{écran-H}}}{2.D_{\text{sujet-écran}}}\right) \quad (17)$$

$$x_{FOV-V} = \frac{1}{Ratio} \cdot x_{FOV-H} \quad (18)$$

Où :

- x_{FOV-H} correspond à l'angle d'ouverture de la caméra à l'horizontale en degrés ;
- $D_{\text{écran-H}}$ correspond à la dimension horizontale de l'écran de projection en mètres ;
- $D_{\text{sujet-écran}}$ correspond à la distance entre les yeux du sujet et l'écran en mètres ;
- x_{FOV-V} correspond à l'angle d'ouverture de la caméra à la verticale en degrés ;
- $Ratio$ correspond au ratio de projection.

L'angle d'ouverture (x_{FOV}) de la caméra première personne est de 58.11° à 180 cm et sa position par rapport à la projetée de la position du fauteuil au sol est de {0 ; 110 ; 0} cm.

La caméra virtuelle représentant la vue basse du Workbench a un angle d'ouverture de 84.14° . Sa position par rapport à la projetée de la position du fauteuil au sol est de {0 ; 125 ; 0} cm.

La caméra virtuelle représentant la vue de la « jupe de visualisation » a un angle de 93.73° . Sa position par rapport à la projetée de la position du fauteuil au sol est de {20 ; 125 ; 0} cm avec une orientation {-43 ; 0 ; 0} °.

III. Démarche

Nous proposons de tester l'hypothèse selon laquelle la visualisation nécessaire à la bonne conduite d'un fauteuil roulant dans EV dépend des objectifs des utilisateurs mais également de l'encombrement de l'environnement.

Pour cela, chaque sujet devra évaluer les trois configurations de visualisation proposées au travers de la conduite d'un fauteuil roulant. Le sujet doit piloter un fauteuil roulant électrique virtuel dans des parcours prédéfinis. Lors de ces parcours, le déplacement du fauteuil virtuel se fera à l'aide d'un joystick afin de correspondre au mode de déplacement d'un fauteuil électrique réel.

Pour chaque visualisation, on propose au sujet deux parties :

- (1) Une partie d'entraînement, composée d'un doublon de chaque parcours dans un ordre prédéterminé, qui permet à chaque sujet de se familiariser avec chaque parcours et à la conduite du fauteuil virtuel.
- (2) Une partie enregistrement où l'utilisateur réalise les parcours le plus naturellement possible. Ses trajectoires sont sauvegardées. Les parcours s'enchainent dans un ordre aléatoire.

Chaque changement de parcours est précédé par un fondu vers un écran noir où le nom de chaque parcours est affiché. Puis un autre fondu amène le sujet vers le parcours suivant. Cette approche permet d'éviter les effets de surprise dus à un changement brusque de position de la caméra.

Les scènes virtuelles représentent graphiquement des parties d'un appartement. Comme tout appartement, ses structures sont composées de murs hauts et d'un plafond. Afin de rendre l'ensemble des parties visuellement réalistes, une texture de type papier peint est appliquée aux murs et une couleur unie est appliquée au sol. Des portes permettant de passer dans une autre salle sont représentées par des images fixes.

Nous avons modélisé trois différents parcours qui prennent place dans notre appartement :

- Descente de marche
- Slalom
- Virage avec passage de porte

Ces parcours représentent trois niveaux d'encombrement différents. L'encombrement traduit la difficulté de l'utilisateur à se déplacer librement dans l'environnement. Il dépend essentiellement de l'espace disponible face à la trajectoire à réaliser. Le niveau d'encombrement de chaque parcours est donné empiriquement.

Ces parcours représentent donc trois niveaux de difficulté dans la conduite de fauteuil. Chacun de ces parcours est issu du WST-P. Ils sont donc des parcours classiques de conduite de fauteuil roulant.

Des éléments de jeu et de parcours spécifiques ont été ajoutés afin de signifier aux sujets les objectifs de chaque partie de l'appartement. Il s'agit de changements des codes de couleurs qui permettent de différencier l'arrivée du parcours à réaliser.

Dans le cas des parcours avec portes et avec slaloms, la zone de fin par une texture rouge dans laquelle il faudra entrer pour valider le déplacement.

Dans le cas du passage de marche, la zone de fin où se trouve la marche sera matérialisée par des couleurs neutres dans des tons de gris.

1. Description des parcours

Parcours 1 – Descente de marche

Ce parcours est le plus facile. Le but de ce parcours est de proposer un accostage frontal du fauteuil face à une difficulté : une descente de marche.

Le sujet doit suivre un couloir droit (Figure 59) et s'approcher le plus près possible de la marche sans la dépasser. Dès que le sujet estime qu'il est le plus proche de la marche, il s'arrête et donne l'ordre d'enregistrer sa position ce qui met fin au parcours.



Figure 59 : Scène correspondant à la descente de marche
(à gauche la vue du sujet au début du parcours ; à droite une vue aérienne)

La zone fait 1000 cm de long sur 150 cm de large. Le départ du fauteuil se fait au début du couloir, à 100 cm du début du couloir (porte blanche). Aucun obstacle ne vient obstruer le déplacement du fauteuil dans ce parcours (hormis les murs). La marche est symbolisée par un trait au sol. Ce trait est arbitrairement positionné 200 cm avant la fin du couloir.

Parcours 2 – Slalom

Ce parcours augmente la difficulté par rapport au précédent en obligeant le sujet à réaliser une trajectoire un peu plus complexe dans un environnement large tout en évitant des obstacles. Le but est d'évaluer le comportement du sujet lorsqu'il se trouve confronté à une suite d'obstacles bas.

Le sujet doit slalomer entre des obstacles disposés en ligne droite (Figure 60). Une flèche au sol indique s'il faut commencer à slalomer par la droite ou par la gauche. Le parcours prend automatiquement fin lorsque le fauteuil entre dans la zone rouge au fond de la salle.

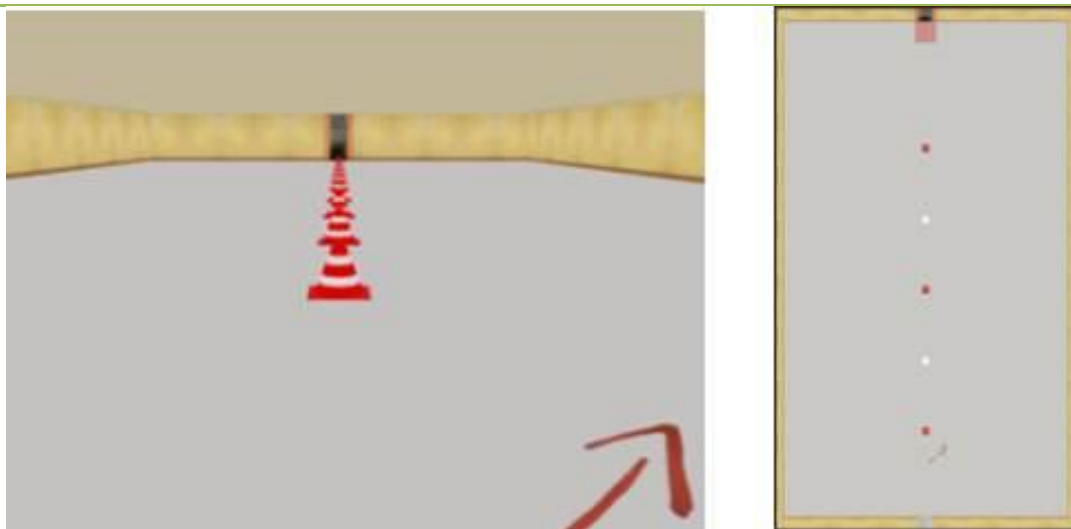


Figure 60 : Scène correspondant à un slalom
(à gauche la vue du sujet au début du parcours ; à droite une vue aérienne)

La salle, dans laquelle se trouvent les obstacles, fait 3500 cm de long et 2000 cm de large (1000 cm de chaque côté du slalom). Il y a donc très peu de chance que le fauteuil heurte les murs. Les obstacles sont des plots de dimensions (Lxlxh) : 50x50x40 cm. Même si on parle d'obstacles, les plots sont non bloquants pour le fauteuil (ils n'entraînent aucune collision). Les plots sont séparés les uns des autres de 400 cm. Le premier plot est situé à 500 cm après le point de départ du fauteuil qui se trouve lui-même à 100 cm du début de la scène. Il y a en tout 5 obstacles. La zone de fin se trouve 700 cm après le dernier plot.

Parcours 3 – Passage de porte

Ce parcours est, à notre sens, le plus difficile des trois. Ce parcours nécessite d'adapter son approche pour passer un virage à angle droit suivi d'obstacles. Cette fois-ci l'espace disponible est restreint par les murs. Le but est d'évaluer la trajectoire du sujet lorsqu'il se trouve confronté à des obstacles hauts et étroits : l'encadrement d'une porte, dans un environnement contraint.

Le sujet doit réaliser un virage dans un environnement étroit avec des obstacles qui cette fois-ci sont bloquants. Ces dernières se trouvent à la sortie d'un virage à droite ou à gauche. Au départ du parcours, la vue étroite (limitée par les murs) ne permet pas au sujet de savoir de quel côté il va devoir tourner. Pour éviter tout effet de surprise, nous avons modélisé une porte avec une flèche indiquant de quel côté effectuer le virage.



Figure 61 : Scène correspondant au couloir avec passage de porte
(à gauche la vue du sujet avant le passage de porte; à droite une vue aérienne)

La zone de départ fait 1000 cm de long sur 150 cm de large. Les zones d'arrivée font 450 cm de long sur 150 cm de large. Le départ du fauteuil se fait au début du couloir, à 100 cm du départ, ce qui laisse 900 cm à parcourir dans le couloir droit. La fin de la scène est représentée par une zone rouge de 150 cm de long dans laquelle il faut rentrer pour valider le parcours.

L'encadrement de la porte se trouve 50 cm après le virage.

2. Population

La population ayant participé à cette étude est composée de 20 personnes réparties de la manière suivante :

- 10 personnes valides
- 8 utilisateurs quotidiens de fauteuil roulant manuel
- 2 utilisateurs quotidiens de fauteuil roulant électrique

3. Données

Des données concernant les sujets sont récupérées avant l'expérimentation (âge, sexe, perception du mal des transports, simulateur, et connaissances des fauteuils).

Des données sont enregistrées durant chaque parcours :

- Position du fauteuil dans le repère global (3 axes) ;
- Direction du fauteuil dans le repère global (seul l'axe z) ;
- Temps ;
- Vitesse instantanée du fauteuil (la vitesse est calculée à l'aide du moteur physique) ;
 - L'accélération instantanée est déduite ($\Delta V_{inst}/\Delta t$) ;
- Collision :
 - Position du point de contact dans le repère global ;
 - Normal au contact ;
 - Temps du contact.

4. Questionnaire utilisateur

Un ensemble de questions basées sur les travaux de (Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001) permet de définir le niveau de présence et le niveau de mal des simulateurs. Nous avons traduit et adapté le questionnaire selon nos besoins. La traduction de certaines expressions en français peut être sujette à controverse. Nous donnons pour chaque traduction, sa formulation originale. Notre questionnaire est divisé en plusieurs catégories :

Présence [Presence] :

- *Réalisme* [Realness] ;
- *Sensation d'être dans un appartement (dans un endroit)* [Sense of being in a place].

Présence spatiale [Spatial Presence] :

- *Impression que l'environnement virtuel n'est pas limité* [Sense of VE continuing behind me] ;
- *Impression de ne voir que des images* [Sense of Seeing only pictures] ;
- *Impression d'être dans un environnement virtuel* [Sense of being in the virtual space] ;
- *Impression "d'être présent" (d'être en représentation) dans l'environnement virtuel* [Sense of acting in the VE] ;
- *Sens d'une présence dans l'environnement virtuel* [Felt present in the VE].

Implication [Involvement] :

- *Conscience du stimulus réel* [Awareness of real world stimuli] ;
- *Conscience du monde réel* [Awareness of real environment] ;
- *Prête attention à l'environnement réel* [Attention to the real environment] ;
- *Captivé par l'environnement Virtuel / Se sent immergé dans l'environnement virtuel* [Captivated by the VE].

Réalisme [Realism] :

- *Comment est le réalisme de l'environnement virtuel en comparaison avec le monde réel ?* [How real seemed VE in comparison with the real world?] ;
- *Homogénéité (Ressemblance ; Cohérence) dans le vécu de l'environnement virtuel et réel* [Consistency of experiencing the VE and a real environment] ;
- *A quel niveau de réalisme semble l'environnement virtuel par rapport à un monde imaginaire ?* [How real seemed VE in comparison with an imagined world?].

Le sentiment de présence est noté en établissant la moyenne des notes obtenues sur l'ensemble des questions des quatre catégories précédentes.

(Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993) propose un ensemble de question permettant de définir le **niveau de mal des simulateurs** (Simulator Sickness).

- *Inconfort général* [General discomfort] ;
- *Fatigue* [Fatigue] ;

- *Mal de tête / tête lourde* [Headache] ;
- *Tension (fatigue) visuelle* [Eye Strain] ;
- *Difficulté à faire le focus sur l'image / Vision floue* [Difficulty focusing] ;
- *Nausée* [Nausea];
- *Difficulté à se concentrer* [Difficulty concentrating] ;
- *Vertige avec les yeux ouverts* [Dizziness with eyes open] ;
- *Vertige avec les yeux fermés* [Dizziness with eyes closed] ;

Nous proposons un ensemble de questions concernant **le champ de vision** offert :

- Appréciation du champ de vision (Field Of View) ;
- Impression de zoom (zoom positif) (1) / impression de minimisation (zoom négatif) (7) sur la visualisation proposée (face, Benchmark + face, jupe + face) ;
- Impression d'être dans un endroit confiné (1) / impression d'être dans un endroit très grand (7).

Enfin, nous demandons à l'utilisateur d'évaluer sa **performance de conduite** :

- *Qualité de la performance de conduite générale* [Overall performance] ;
- Conduite dans le couloir avec virage :
 - *Qualité d'évitement des murs* [Wall collision] ;
 - *Qualité d'évitement des passages étroits* [Path collision] ;
 - *Appréciation de la performance (temps)* [Time spent].
- Conduite dans le slalom :
 - *Qualité d'évitement des murs* [Wall collision] ;
 - *Qualité d'évitement des passages étroits* [Path collision] ;
 - *Appréciation de la performance (temps)* [Time spent].
- Conduite puis passage de marche :
 - *Qualité d'évitement des murs* [Wall collision] ;
 - *Qualité de positionnement vis-à-vis de la marche* ;
 - *Appréciation de la performance (temps)* [Time spent].

Ces questions sont établies sur une échelle de Likert (Göb, McCollin, & Ramalhoto, 2007). Il s'agit d'une notation sur 7 points où 1 est l'appréciation la plus défavorable et 7, l'appréciation la plus favorable.

IV. Résultats

Nous présentons les résultats de cette étude en deux parties. Nous présentons d'abord les résultats de l'évaluation subjective des vues étudiées au travers des questionnaires utilisateurs. Puis, nous analyserons les trajectoires à l'aide de différents indicateurs afin d'évaluer de façon objective les vues selon certains indicateurs.

1. Ressenti des sujets

Les ressentis des sujets sont recueillis à l'aide du questionnaire utilisateur et des commentaires de chacun des sujets à la fin de l'expérimentation. Ces données subjectives nous permettent de faire une évaluation générale des différentes vues. Ils nous permettent d'évaluer si les configurations matérielles qui leur sont associées sont bien perçues par les sujets.

Nous donnons dans le Tableau 13 les résultats du questionnaire pour l'ensemble des sujets. Nous rappelons que ces résultats sont les moyennes des notes données par les sujets en se basant sur une échelle de Likert allant de 1 à 7.

Tableau 13 : Résultats du questionnaire utilisateur pour tous les sujets

	Vue de Face (VF)	Vue Workbench (VW)	Vue par Jupe (VJ)
Présence	4,495	4,719	5,047
Mal des simulateurs	6,271	6,021	6,333
Performances de conduite	4,063	4,938	5,188
Appréciation du champ de vision	3,375	4,438	5,625
Appréciation de la vue	4,063	4,438	5,875

L'évaluation nous permet d'établir un classement des vues utilisées. La vue la plus appréciée des sujets est la VJ (5.875) suivi de la VW (4.438) et enfin la VF (4.063). Ce classement est le même pour toutes les catégories à part pour le « Mal des simulateurs ».

L'augmentation du champ de vision par l'ajout de projection proche du sujet favorise donc le sentiment de présence. Il améliore également le ressenti du sujet sur sa qualité de conduite. En effet, nous pouvons noter que le sentiment de présence est dépendant du champ de vision du système. Plus le champ de vision est grand, plus le sentiment de présence est important. Dans notre cas, nous agrandissons le champ de vision inférieur du sujet (ce qui se passe à ses pieds). De plus, les parcours ne nécessitaient que d'aller vers l'avant à l'aide du fauteuil. Nous avons donc augmenté la quantité d'informations du sujet sur son environnement proche. Les informations sur l'environnement proche sont diffusées par une projection proche du sujet.

La VJ et la VF induisent un mal des simulateurs comparable. La VW induit un mal de simulateur plus important. Notre hypothèse est que le mal des simulateurs n'est pas lié à la proximité de la vue mais, de problèmes de défauts de raccordement entre la projection verticale et horizontale. La VJ et la VF induisent peu le mal des simulateurs car il n'y a pas ce défaut. La VJ laisse un « trou » entre la projection horizontale et verticale. Ce trou est inexistant dans la VW. Il faut donc que les deux projections soient parfaitement coordonnées afin de faciliter la transition du regard d'une projection à une autre.

2. Trajectoires

Indicateurs utilisés

Pour rappel, nous avons trois configurations de visualisation différentes à comparer :

- Vue de Face ou **VF**
- Vue de type « Workbench » ou **VW**
- Vue avec jupe de visualisation ou **VJ**

La comparaison de ces configurations se fait au travers d'indicateurs issus de la trajectoire réalisée au cours de divers ateliers. Pour évaluer la performance de conduite dans chaque atelier, nous avons choisi des indicateurs classiques de récupération de trajectoire :

- Temps de parcours
- Distance parcourue
- Vitesse moyenne
- Nombre de collision

De plus, des indicateurs spécifiques à chaque atelier ont été calculés :

- Distance d'arrêt à la marche (Atelier 1) : il s'agit de la distance entre les roues avant du fauteuil et la ligne représentant la marche.
- Ecartement moyen à la ligne droite (atelier 2) : il s'agit de la distance moyenne entre le fauteuil et la ligne passant par les plots.
- Distance minimale moyenne aux obstacles (atelier 2)
- Distance minimale moyenne au point d'inflexion (atelier 3) : il s'agit de la distance minimale à un point virtuel définit à l'intersection des deux portes.

Pour chaque indicateur calculé, l'analyse se passe en deux étapes :

1. Le test de Wilcoxon

Il s'agit d'un test de comparaison de moyenne. Il permet de rejeter l'hypothèse nulle, à savoir : si les échantillons considérés sont issus d'une même distribution. Le test de Wilcoxon permet de comparer deux échantillons.

Le test permet de calculer une p-value (que nous nommerons p par la suite). Si cette dernière est inférieure à 0.05 (correspondant à une erreur de 5%) alors les deux échantillons considérés sont significativement différents.

Important : Si le résultat du test de Wilcoxon (p-value) est > 0.05 , cela ne veut pas dire que les échantillons sont semblables (il faudrait procéder à d'autres tests pour prouver cette hypothèse). On ne peut tout simplement pas conclure sur leur ressemblance.

2. Calcul de la moyenne

Si le test précédent est validé alors la moyenne permet de comparer les performances de conduite de sujets au travers de l'indicateur concerné et suivant la configuration utilisée.

Le résultat de ce calcul est présenté sous la forme d'un histogramme permettant de comparer les trois configurations pour chaque groupe.

Pour chaque indicateur présenté, nous donnons les résultats du test de Wilcoxon ainsi que les conclusions associées. Puis, en fonction du test de significativité, nous présentons un histogramme des moyennes calculées et analysons les valeurs par configuration.

L'ensemble complet des résultats et tests statistiques se trouve dans l'annexe 3 de ce mémoire. Dans la suite de ce chapitre, nous ne donnerons que les histogrammes des indicateurs pour lesquels l'analyse statistique a été significative.

Couloir avec descente de marche

Lors d'une descente de marche avec un fauteuil roulant manuel ou électrique, il faut préparer sa descente. Il faut s'approcher le plus près possible de la marche afin d'évaluer si l'on a la capacité de la franchir.

Il n'y a pas de collision dans le couloir avec descente de marche : le fauteuil à commander a un déplacement standard, la scène est droite et il n'y a aucun obstacle sur le parcours. De par sa simplicité, les sujets ont très peu de marge d'erreur.

Un seul indicateur ressort dans cet atelier : la distance à l'arrivée. En effet, dans notre cas, la vitesse moyenne est équivalente pour l'ensemble des sujets. De ce fait, le temps de parcours et la distance parcourue sont tous liés à la distance d'arrêt choisie par le sujet. Au final, seule la distance d'arrêt à la marche s'est révélée un indicateur significatif.

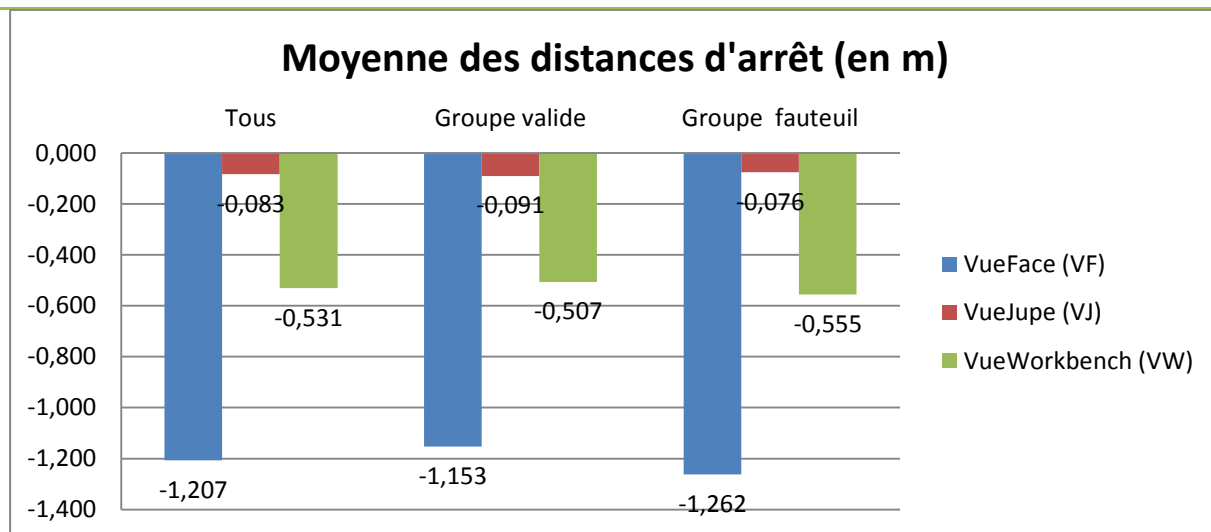


Figure 62 : Distances d'arrêt à la marche pour chaque visualisation et pour chaque groupe

Cet indicateur dénote un comportement de précision. Nous constatons que la précision de placement du fauteuil est la même pour tous les groupes en fonction de la configuration utilisée (Figure 62). La visualisation proche de l'utilisateur est donc correctement interprétée et utilisée par l'ensemble des sujets qu'ils soient experts en fauteuil ou novices.

Slalom

Lors d'un slalom, il faut à la fois contrôler sa trajectoire tout en estimant la distance des obstacles. On augmente ici la contrainte de l'environnement par rapport à l'atelier précédent.

Il est important de noter que dans le cas du slalom, aucun indicateur n'a pu fournir de données exploitables pour tous les groupes en même temps que toutes les configurations. Les résultats actuels ne permettent donc pas de comparer les performances utilisateurs entre les groupes. A cause de cela, nous ne pouvons qu'analyser le comportement général en fonction des configurations pour l'ensemble des sujets. Nous retirons donc les résultats des groupes de valides et d'UFR pour notre analyse.

Les indicateurs de performances choisis ne permettent, dans le cas du slalom, que de comparer la VW aux deux configurations. On ne peut donc pas établir de classement entre la VJ et la vue VF. Cependant, ceci nous amène à penser que la VW sort du lot pour cet atelier.

L'analyse de la vitesse moyenne (Figure 63) et de la déviation moyenne (Figure 64) indique que la VW est la vue avec laquelle les sujets se sentent le plus à l'aise. En effet, c'est avec cette vue que les sujets ont manipulé le fauteuil avec une vitesse plus importante (signe qu'ils ont pris confiance avec cette vue). De plus, c'est avec cette vue qu'ils s'éloignent le moins de la ligne imaginaire passant par les plots.

La VW est la vue qui correspond le mieux à un environnement ouvert sans trop d'obstacles. Elle semble être la plus intuitive. Elle permet d'aller vite donc de réduire le temps de parcours.

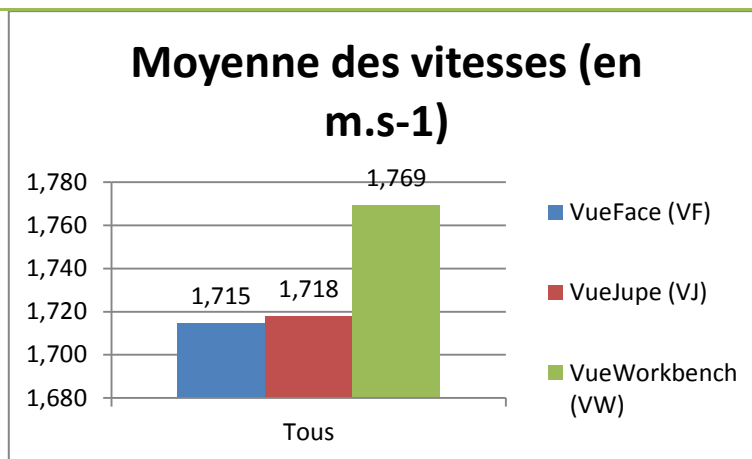


Figure 63 : Vitesses moyennes des sujets durant le slalom pour chaque visualisation

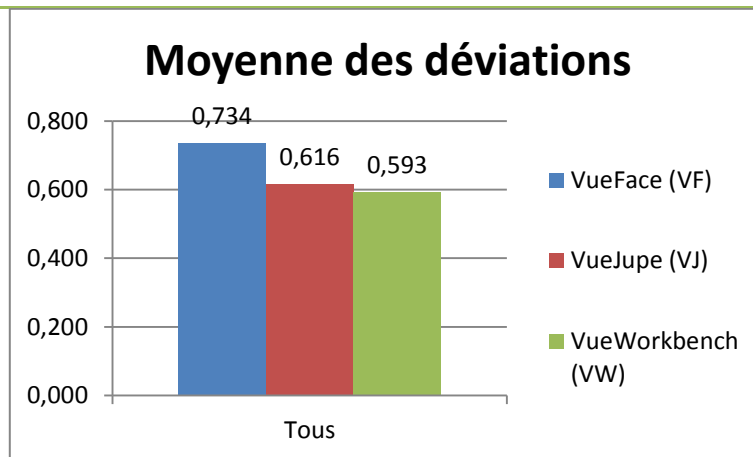


Figure 64 : Déviations moyennes des sujets durant le slalom pour chaque visualisation

Parallèlement à cela, la VW est également la vue avec laquelle les sujets ont eu le plus de mal à situer le fauteuil par rapport à l'environnement. Ils ont eu du mal à estimer où est le fauteuil par rapport aux plots (et non l'inverse car le sujet peut voir le plot et non son fauteuil virtuel). En effet, la VW est celle avec laquelle les sujets ont le plus de collisions (Figure 65) car ils se rapprochent le plus des obstacles (Figure 66) au point de les toucher.

Il faut rappeler que les plots disposés dans le slalom sont non bloquants. En utilisant la VF ou la VW, les sujets n'ont aucune idée s'ils ont touché le plot car aucune réaction n'est engendrée en cas de collision. La VW induit un décalage (minimisation) entre la position réelle du fauteuil et celle estimée par l'utilisateur par rapport aux obstacles. Ainsi, il se rapproche dangereusement de l'obstacle au risque d'entrer en collision avec lui.

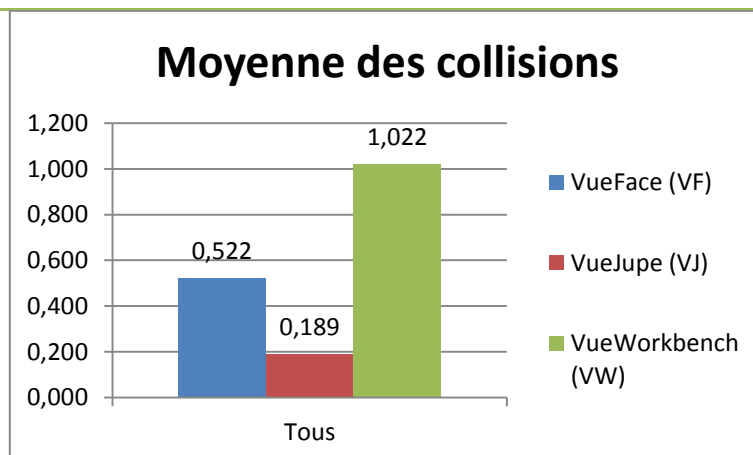


Figure 65 : Nombre moyen de collisions des sujets durant le slalom pour chaque visualisation

Moyenne des distances minimales aux obstacles

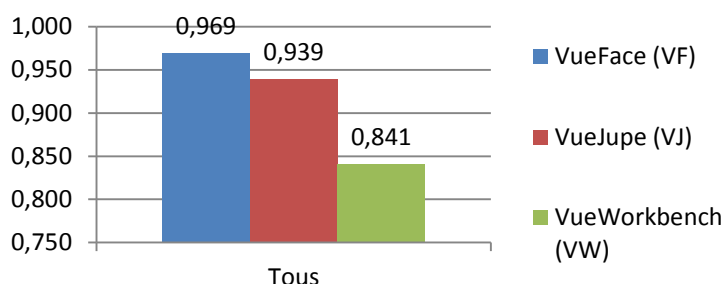


Figure 66 : Distance minimale aux obstacles des sujets durant le slalom pour chaque visualisation

En conclusion, le slalom nous permet de dire que la VW est très utile dans des espaces dégagés sans grand besoin de manœuvre. Dans des endroits confinés où la précision importe beaucoup, il faut préférer la VJ comme dans le cas de la descente de marche.

Virage avec passage de porte

On augmente ici la contrainte de l'environnement par rapport à l'atelier précédent. Les murs sont plus proches ce qui limite l'approche du virage. De plus, l'obstacle considéré (les montants de la porte) est bloquant.

Il est important de noter que dans le cas du virage avec passage de porte, aucun indicateur n'a pu fournir de données exploitables pour tous les groupes en même temps que toutes les configurations. Les résultats actuels ne permettent donc pas de comparer les performances utilisateurs entre les groupes. A cause de cela, nous ne pouvons qu'analyser le comportement général en fonction des configurations pour l'ensemble des sujets. Nous retirons donc les résultats des groupes de valides et d'UFR pour notre analyse.

Comme dans le cas du slalom, les indicateurs de performance choisis ne permettent que de comparer une seule vue par rapport aux deux autres. Dans ce cas, on ne peut que comparer la VJ aux deux autres. De la même manière, ceci nous amène à penser que la VJ sort du lot pour cet atelier.

L'analyse des collisions, que ce soit en nombre (Figure 67) ou en temps (Figure 68), montre que la VJ est la vue avec laquelle les sujets perçoivent le mieux leur environnement. En effet, la VJ permet de réduire significativement le nombre et le temps de collision par rapport à la VF et à la VW. Le temps moyen par collision est lui aussi réduit. La VJ permet au sujet de mieux comprendre la cause de la collision et de trouver une solution efficace plus rapidement.

Moyenne des collisions

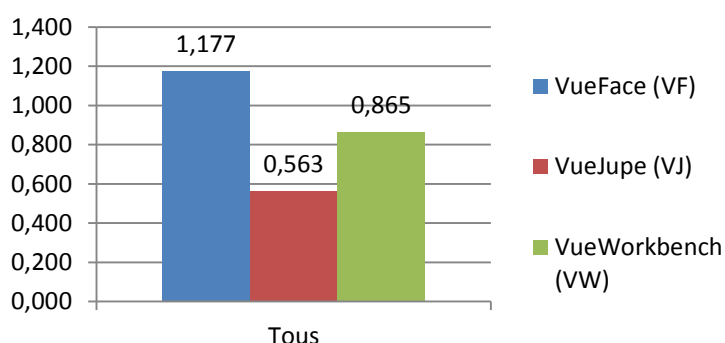


Figure 67 : Nombre moyen de collisions des sujets durant le passage de porte pour chaque visualisation

Moyenne des temps de collisions (en s)

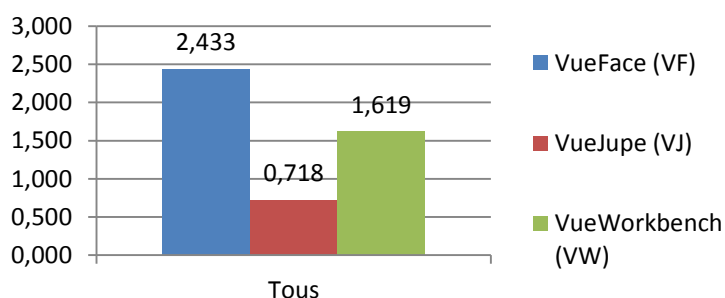


Figure 68 : Temps de collision moyen des sujets durant le passage de porte pour chaque visualisation

Cependant, la VJ ne permet pas la trajectoire la plus douce. La VJ incite les sujets à se rapprocher du point d'inflexion (Figure 69). Le point d'inflexion est le point virtuel défini comme l'intersection des droites passant par le centre de chaque bout de couloir. La VJ incite donc les sujets à s'éloigner des murs pour réaliser le virage. Ils ont donc tendance à réaliser un virage plus serré leur évitant ainsi les collisions avec les murs et ainsi mieux se préparer à passer la porte.

Moyenne des distances minimales au point d'inflexion (en m)

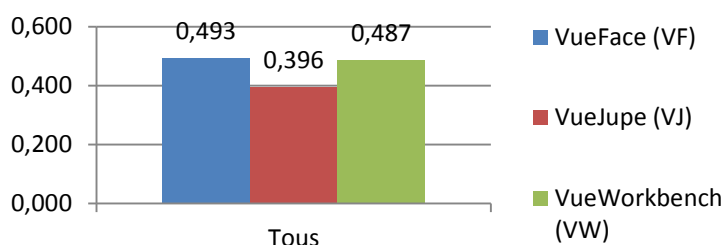


Figure 69 : Distance minimale au point d'inflexion des sujets durant le passage de porte pour chaque visualisation

Nous pouvons affirmer que la VJ améliore les performances du couloir de façon générale et significative. Le nombre et le temps de collision sont réduits de manière significative à l'aide de la VJ, ainsi que la distance minimale au point d'inflexion qui est améliorée. Tout ceci nous permet de dire que la Jupe permet de passer le virage et la porte avec plus de sécurité.

Les résultats ont validé l'hypothèse selon laquelle plus l'environnement est restreint, plus l'utilisateur a besoin d'une vue proche pour la conduite. La VJ s'est révélée efficace pour le positionnement de précision (dans l'atelier de descente de marche) et la conduite en environnement contraint (dans l'atelier du passage de porte). A l'aide de cette vue, les sujets ont pu clairement évaluer la distance des obstacles proches par rapport au fauteuil roulant virtuel. La VJ permet de mieux se positionner, d'éviter les murs et de trouver une solution de secours en cas de collision.

Cependant, même si la VJ est plus sécuritaire car elle permet de mieux « se placer », la VW est la plus efficace en terme de confort même si elle induit plus de collisions. Dans le cadre du slalom, la VW a permis au sujet de conduire plus vite tout en minimisant la déviation par rapport aux plots. De plus, dans le cadre du virage, les sujets ont effectué des trajectoires plus courbes passant plus loin du point d'inflexion. Ce confort s'explique en partie grâce aux commentaires des sujets : la VW est une vue qui étend directement la VF et donc augmente « naturellement » le champ de vision de l'utilisateur. La VJ telle qu'elle a été conçue, laisse une zone morte entre la VF et la surface de projection sur la Jupe. Ce trou empêche le sujet de suivre l'évolution des obstacles par rapport au fauteuil de façon continue. Le sujet peut donc être surpris par un obstacle qui apparaît à proximité.

V. Adaptation

Le test présenté précédemment a permis de valider notre hypothèse selon laquelle la visualisation nécessaire à la bonne conduite d'un fauteuil roulant dans EV est variable selon l'utilisateur et l'encombrement de l'environnement.

Nous avons testé différentes configurations d'immersion visuelle adaptant le champ de vision de l'utilisateur. Selon la configuration utilisée, le sujet bénéficiait d'informations plus ou moins proches de son fauteuil. En effet, la VF est une vision orientée vers l'avant du fauteuil avec un champ de vision limité. La VW offre une augmentation du champ de vision vers le bas continu à la VF. La VJ, quant à elle, est discontinue de la VF mais propose un champ de vision supplémentaire centré sur le fauteuil. L'objectif est d'améliorer les performances de conduite des utilisateurs en augmentant le champ de vision du simulateur.

Les sujets ont testé ces configurations d'immersion visuelle par le déplacement dans des parcours adaptant la contrainte de l'environnement et la trajectoire à réaliser. Le premier parcours est un couloir droit en ligne dans lequel le sujet doit se rapprocher au plus près possible d'une ligne au sol. La trajectoire à réaliser (ligne droite) est simple. Le deuxième parcours est un slalom dans un environnement ouvert. Les obstacles que le sujet doit contourner ne sont pas bloquants. La trajectoire à réaliser demande plus d'actions au niveau de la commande du fauteuil tout en restant relativement simple. Le dernier parcours est un couloir dans lequel les sujets doivent effectuer un virage à 90° puis passer l'encadrement d'une porte. Les murs sont bloquants donc la marge de manœuvre pour réaliser la trajectoire est réduite. L'environnement est donc très contraint et la trajectoire plus difficile à réaliser que dans les autres parcours.

L'évaluation de la présence et l'analyse de trajectoire permettent de préconiser la configuration d'immersion visuelle en fonction de l'encombrement de l'environnement et de la tâche à réaliser. En effet, les résultats du questionnaire utilisateurs réalisés sur l'ensemble des sujets permettent de valider que l'adaptation du champ de vision utilisateur (i.e. le changement de configuration) modifie le sentiment de présence des sujets ainsi que le ressenti sur leurs performances de conduite. Plus le champ de vision intègre des informations proches de l'utilisateur, meilleures sont la présence et les performances de conduite.

L'analyse de trajectoire permet d'évaluer chaque configuration d'immersion de manière objective. La VF est la vue la plus couramment utilisée. Elle reste cependant insuffisante lorsque l'environnement comporte des contraintes. Elle est la configuration avec laquelle les sujets ont obtenus les résultats les moins bons. A l'inverse la VJ est la vue qui permet la meilleure précision de conduite. Elle permet un placement précis du fauteuil par rapport aux obstacles et permet également de mieux éviter ces derniers. Ceci étant dit, la VW est à notre sens la vue la plus « naturelle ». C'est avec cette vue que les sujets ont pu effectuer la trajectoire la plus rapide. Ceci est vérifié dans le cas du slalom. Elle permet également de minimiser le déplacement au risque d'entraîner des collisions. Dans le virage à 90°, les sujets passent plus près du point d'inflexion avec la VJ.

Si l'encombrement de l'environnement est un facteur permettant de préconiser une configuration d'immersion visuelle, la tâche à accomplir l'est tout autant. Elle détermine le niveau de présence et de qualité de conduite attendue par le système. Dans notre cas, le projet *AccesSim* vise à aider les

architectes à réaliser un diagnostic d'accessibilité, à sensibiliser le grand public aux problèmes de mobilité, à donner aux thérapeutes ou utilisateurs de fauteuil roulant un outil d'apprentissage à l'usage de fauteuil roulant. Les besoins en immersion d'un architecte ne sont pas les mêmes qu'un utilisateur de fauteuil. L'architecte peut se contenter de la configuration d'immersion basique (avec un simple d'écran d'ordinateur). Son but n'est pas de se mettre en situation mais de rassembler des données au sujet d'un environnement urbain afin d'en créer un rapport. Une configuration de visualisation classique, apportant un sentiment de présence faible, suffit. Pour sensibiliser le grand public, il faut un sentiment de présence plus élevé car l'utilisateur est mis en situation. La visualisation sur une toile tendue (i.e. VF) conjuguée à l'utilisation de différentes vues peut convenir. On peut également penser à améliorer le sentiment de présence en utilisant la VW pour susciter une meilleure réponse à la situation rencontrée. Enfin, le thérapeute ainsi que l'utilisateur de fauteuil roulant ont de hautes exigences en matière de qualité de conduite car il désire respectivement enseigner et apprendre l'usage de fauteuil. Il s'agit de placer l'UFR dans une configuration la plus immersive afin de susciter un sentiment de présence fort.

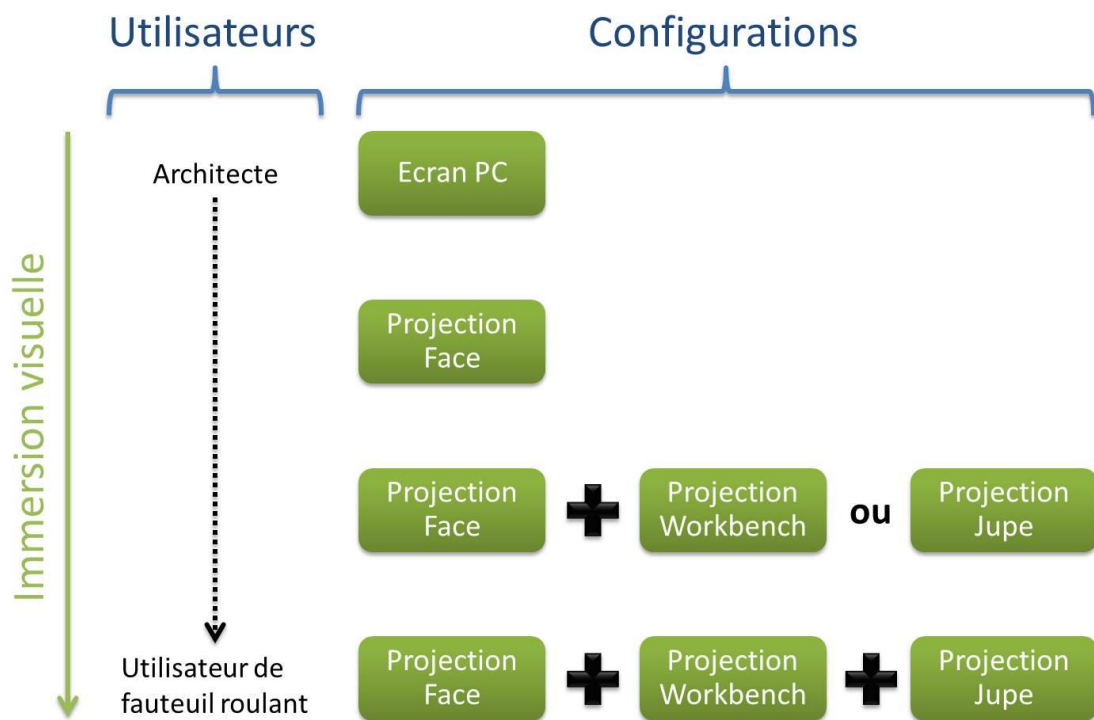


Figure 70 : Schéma de la préconisation d'immersion visuelle

Chapitre 7

Conclusion

Nos travaux de thèse se sont déroulés dans le cadre du projet FUI *AccesSim* financé par la région Ile de France. Le projet *AccesSim* vise au développement d'un outil d'aide au diagnostic d'accessibilité utilisant une simulation 3D et la Réalité Virtuelle. A cet outil logiciel, nous associons une plateforme robotique pour obtenir un simulateur ou Environnement Virtuel pour la conduite en fauteuil roulant.

Un EV est un système dans lequel on suggère à l'utilisateur qu'il est dans un monde virtuel dans lequel il puisse interagir. Les performances d'un environnement virtuel sont basées sur l'évaluation du sentiment de présence de l'utilisateur dans le monde virtuel. Ce sentiment repose sur trois facteurs principaux : l'immersion, l'interaction et l'imagination. Une notion sous-jacente est la notion de réalisme. Le réalisme correspond à la transmission d'informations sans aucun regard sur la nature de la transmission. Le point clé, dans ce cas, n'est pas de reproduire le réel à tout prix mais de faire passer un message à l'utilisateur.

Le simulateur de fauteuil roulant développé dans le cadre du projet *AccesSim* fournit à l'utilisateur deux fonctionnalités principales : le diagnostic d'accessibilité et la navigation dans le monde virtuel. Le diagnostic est une application bureautique exploitant la simulation 3D pour annoter l'environnement à étudier et fournir un rapport. La navigation dans le monde virtuel est l'application visant à mettre l'utilisateur en situation de conduite afin de l'informer, lui enseigner, lui transmettre des compétences transposables du monde virtuel à la vie réelle.

La navigation dans le monde virtuel est réalisée à l'aide de la plateforme robotique. Cette dernière est composée d'interface de commande intuitive. L'utilisateur peut piloter un fauteuil roulant virtuel à l'aide d'un joystick (à l'instar d'un fauteuil roulant électrique) ou bien à l'aide des mains courantes de son fauteuil (avec un fauteuil roulant manuel). Si la plateforme robotique envoie des commandes à l'aide de ces interfaces, elle peut également transmettre des informations à l'utilisateur via différents retours sensoriels. L'immersion est déterminée par les différents retours sensoriels fournis : visuel, haptique et vestibulaire.

Les travaux présentés dans cette thèse ont tous pour objectifs d'améliorer l'expérience de conduite dans le monde virtuel. L'hypothèse de nos travaux est que la navigation en fauteuil roulant dans un monde virtuel est une application nécessitant l'adaptation des retours sensoriels (donc de l'immersion) afin d'être la plus efficace possible.

Pour étudier cela, notre méthode de travail s'est déroulée en deux étapes. Premièrement, nous avons procédé à une analyse du comportement de l'utilisateur afin d'étudier l'impact de l'utilisation de l'EV sur le comportement de conduite de l'utilisateur. Secondement, nous avons étudié le réalisme (défini comme la transmission d'informations à l'utilisateur) de deux retours sensoriels : haptique et visuel.

L'analyse de comportements dans le cadre de la conduite en fauteuil nous a permis d'identifier un besoin d'adaptation de la plateforme en fonction de l'individu. Une première analyse consiste à comparer les comportements de conduite entre situation réelle et virtuelle. Elle est basée sur l'identification de comportement à l'aide de méthodes de classification appliquées aux actions du joystick durant la navigation. La méthode de classification a permis d'extraire deux comportements de conduite différents en situation réelle et virtuelle avec une configuration de l'EV minimale. Les comportements réels et virtuels sont équivalents deux à deux. Certains sujets ont néanmoins changé de classe de comportement en passant du monde réel au monde virtuel. Une seconde

expérimentation a permis de montrer que l'ajout d'un système de mouvement à la configuration minimale de l'EV permet d'améliorer la perception du mouvement (donc la situation du fauteuil) dans le monde virtuel. Cette amélioration n'est pas la même en fonction de l'expérience préalable de l'utilisateur.

Cette première phase d'analyse du comportement utilisateur face aux différents retours sensoriels confirme le besoin d'adaptation de la plateforme. L'EV, dans sa configuration minimale, n'est pas suffisant pour certains utilisateurs.

Dans notre seconde phase, nous ajoutons de l'information à l'utilisateur. Soit par l'ajout de mouvement, soit par l'augmentation du champ de vision. Notre hypothèse est que l'ajout d'informations doit être adapté en fonction de l'utilisateur. La méthodologie de ces deux études repose sur la sélection d'une population ciblée effectuant une série de tests sur un ou plusieurs cas d'étude simples. Selon les résultats de l'étude, nous pouvons concevoir une méthode d'adaptation du retour sensoriel étudié.

Nous avons étudié la transmission d'informations de mouvement par rapport à la configuration minimale via un système de mouvements composé de quatre vérins électriques. L'utilisation de vérins électriques limite l'amplitude des mouvements que la plateforme peut effectuer. Malgré cela, notre expérimentation pour une situation, la descente de marche, montre que la transmission d'informations est possible mais doit être adaptée. Les sujets de l'expérimentation interprètent différemment le mouvement ressenti selon leur sensibilité. Cette étude repose sur un cas isolé qui permet de simuler au plus proche le comportement du fauteuil. Les limitations du système de mouvement nous obligent à simplifier la loi de commande notamment au niveau des translations afin d'obtenir un comportement fiable sur le long terme. Il est donc nécessaire d'étudier ces limitations afin de concevoir une loi de commande adaptable pour la navigation en fauteuil. Nous avons proposé une méthode itérative permettant de moduler les effets du système de mouvement en fonction des préférences de l'utilisateur. Cette méthode demande une phase de calibration de la plateforme avant son utilisation.

Nous avons proposé une configuration modulaire composée de trois vues (projection). Ces trois configurations nous ont permis d'étudier l'ajout d'informations visuelles par rapport à la configuration minimale. Chaque vue correspond à l'ajout d'un projecteur associé à un point de vue caméra différent. Les informations ajoutées sont plus ou moins proches de l'utilisateur et de son fauteuil. L'ajout de champs de vision supplémentaires est bien perçu par les utilisateurs. Nous avons montré que les trajectoires diffèrent en fonction de l'encombrement de l'environnement étudié. Plus l'environnement est contraint, plus l'utilisateur a besoin d'informations proches de son fauteuil pour adopter des trajectoires sûres. Dans notre expérimentation, les informations proches de l'utilisateur sont dissociées des informations de la vue de face standard. Or, les retours utilisateurs montrent qu'une continuité est préférable afin de ne pas perturber l'utilisateur durant la navigation. Il est cependant difficile de concevoir un système multi affichage transportable. Ce type de systèmes est très difficile à calibrer finement. L'augmentation des performances des HMD permet de bénéficier d'un angle de vision de virtuellement de 360° tout en évitant les problèmes de mal du simulateur. Il est donc intéressant d'étendre l'étude à ce type d'affichage. Malgré cela, nous proposons une méthode numérique permettant de préconiser la configuration des retours visuels de l'EV en

fonction des objectifs utilisateurs et de l'environnement. Nous avons montré que nos différentes visualisations sont complémentaires et permettent une configuration modulaire de la plateforme.

Nous avons donc montré que la perception de l'environnement à l'aide d'un EV est dépendante de l'utilisateur. Il est donc nécessaire de l'adapter. Au cours de cette, nous avons proposé des méthodes d'adaptation pour deux des retours sensoriels fournis par la plateforme : les retours visuel et les retours vestibulaires.

L'une des perspectives de ces travaux consiste à intégrer et étudier les retours haptiques via l'utilisation des rouleaux à retours d'efforts. En effet, de la même manière que pour les retours vestibulaires, il nous paraît nécessaire de moduler les efforts à fournir pour piloter un fauteuil roulant manuel en fonction des capacités de l'utilisateur. La capacité de ce dernier à générer de la force musculaire influe sur son expérience dans l'environnement virtuel. Les situations qu'il peut affronter en fauteuil roulant manuel sont limitées. Afin d'entraîner et d'améliorer les capacités de l'utilisateur, une méthode d'adaptation doit être conçue.

Avec notre méthodologie, nous étudions les retours sensoriels de manière indépendante. Nous avons fait le choix d'étudier un réalisme module par module, c'est-à-dire, un réalisme issu d'un unique retour sensoriel afin d'évaluer les performances de chaque composantes de notre système. Or, la conduite en fauteuil roulant (manuel ou électrique) est une expérience multi sensoriel complexe. Il est donc intéressant d'étendre cette étude à des configurations plus complexes de l'EV.

L'autre perspectives de ces travaux consiste à étudier les possibles conflits (tels que des contradictions d'informations ou bien des problèmes de latence, etc...) entre les différents retours fournis. Ces conflits peuvent nuire à l'immersion et au réalisme de la simulation et de l'expérience utilisateur. Dans ce cas de figure, il est nécessaire d'établir des configurations avancées de la plateforme mettant en jeu une combinaison des trois retours sensoriels disponible. A partir de ces configurations, une évaluation du déplacement de l'utilisateur au sein de l'EV permettra de montrer si l'interprétation des retours sensoriels améliore le comportement utilisateur ou, à l'inverse, si cela le perturbe.



Figure 71 : La plateforme *AccesSim* dans sa dernière version

Annexes

Annexe 1 –

La classification Fuzzy C-Means

La méthode de classification Fuzzy C-Means. C'est une technique de classification floue et non supervisée :

- Elle se base sur la théorie des ensembles flous. Un ensemble flou est un ensemble dont les limites ne sont pas précisément définies. Cela se traduit par le fait qu'une valeur peut plus ou moins appartenir à un ensemble selon une fonction d'appartenance (à l'inverse du cas classique où une valeur appartient ou non à un ensemble).
- La classification évolue à l'aveugle au fur et à mesure des itérations. Chaque donnée est traitée comme étant une variable aléatoire.

L'idée de base est donnée par (Dunn, 1973). La dernière formulation de l'algorithme date de (Ramze Rezaee, Lelieveldt, & Reiber, 1998). La méthode Fuzzy C-Means a un vaste domaine d'applications telles que le génie agricole, l'astronomie, la chimie, la géologie, l'analyse d'images, les diagnostics médicaux et l'analyse de formes (Bezdek, 1987). Elle est notamment appliquée dans le cadre de la reconnaissance d'émotions via la classification de signaux EEG dans le domaine des interfaces cerveau machine (Murugappan, Rizon, Nagarajan, & Yaacob, 2010).

L'algorithme FCM s'appuie sur l'optimisation d'un critère quadratique de classification où chaque classe est représentée par son centre de gravité. L'algorithme nécessite de connaître le nombre de classe au préalable. Il permet alors de générer des classes par un processus itératif en minimisant la fonction J_m qui est la somme pondérée des carrés des écarts au sein des groupes. La définition formelle de J_m est :

$$J_m(U, C, X) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C \mu_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2$$

Où :

- m est un nombre supérieur à 1 ;
- $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ est un vecteur des points à classer ;
- $C = (c_1, c_2, \dots, c_C)$ est un vecteur de classes prototypes inconnues au départ et qui se construisent au fur et à mesure du déroulement de l'algorithme ;
- μ_{ij} est le degré d'appartenance de la donnée $x_i, 1 \leq i \leq N$ où $\mu_{ij} \in [0,1]$ et $\sum_{j=1}^C \mu_{ij} = 1$
- $U = [\mu_{ij}]_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq C}$ est une matrice contenant les degrés d'appartenance de chaque point $x_i, 1 \leq i \leq N$ à chacune des classes $c_j, 1 \leq j \leq C$

Annexe 2 –

Tests non paramétriques

Les tests statistiques servent à tester (valider ou rejeter) une hypothèse. La première étape d'un test est de valider l'hypothèse nulle. En statistiques, l'hypothèse nulle est une hypothèse postulant une égalité entre deux données d'un modèle (il y a une différence significative entre les échantillons A et B). Un test statistique calcule une valeur appelé « valeur-p » (ou p-value en anglais) constituant le niveau de signification du test (le hasard de l'échantillonnage pouvant fausser les conclusions). La procédure généralement employée consiste à comparer la valeur-p à un seuil préalablement défini (traditionnellement 5 % ou 0.05). Si la valeur-p est inférieure à ce seuil, on rejette l'hypothèse nulle et le résultat du test est déclaré « statistiquement significatif ».

On dispose actuellement de nombreux tests statistiques différents qui peuvent être utilisés pour arriver à une décision concernant une hypothèse. Parmi eux, il existe les tests dit « non paramétriques ». Un test non paramétrique est un test dont le modèle ne précise pas les conditions que doivent remplir les paramètres de la population dont a été extrait l'échantillon. Nous précisons dans cette annexe, l'ensemble des tests énoncés dans ce mémoire.

1. Le test de Wilcoxon

Le test de rang signé de Wilcoxon est un test d'hypothèse statistique non paramétrique utilisé pour comparer deux échantillons appariés, ou des mesures répétées sur un seul échantillon pour déterminer si la moyenne des rangs de leurs populations diffère. Il peut être utilisé comme une alternative au test t de Student, lorsque la population ne peut pas être considérée comme une distribution normale.

Ce test vérifie l'hypothèse selon laquelle la différence moyenne entre les deux mesures est nulle.

2. Le test de Kruskal-Wallis

Le test de Kruskal-Wallis est un procédé non paramétrique pour tester si les échantillons proviennent de la même distribution. Il est utilisé pour comparer plus de deux échantillons qui sont indépendants. L'équivalent du test paramétrique de Kruskal-Wallis est l'analyse unidirectionnelle de la variance (ANOVA). Lorsque le test de Kruskal-Wallis conduit à des résultats significatifs, alors au moins l'un des échantillons est différent des autres. Le test ne permet pas d'identifier où les différences se produisent ni combien de fois.

Comme il s'agit d'une méthode non paramétrique, le test de Kruskal-Wallis n'assume pas une distribution normale des valeurs, contrairement à ANOVA. Cependant, le test suppose une distribution identique en forme et mise à l'échelle pour chaque groupe, sauf pour une différence de médianes.

Kruskal-Wallis est également utilisé lorsque les groupes examinés sont de taille inégale (nombre différent de participants).

Ce test vérifie l'hypothèse selon laquelle la distribution est la même dans tous les groupes.

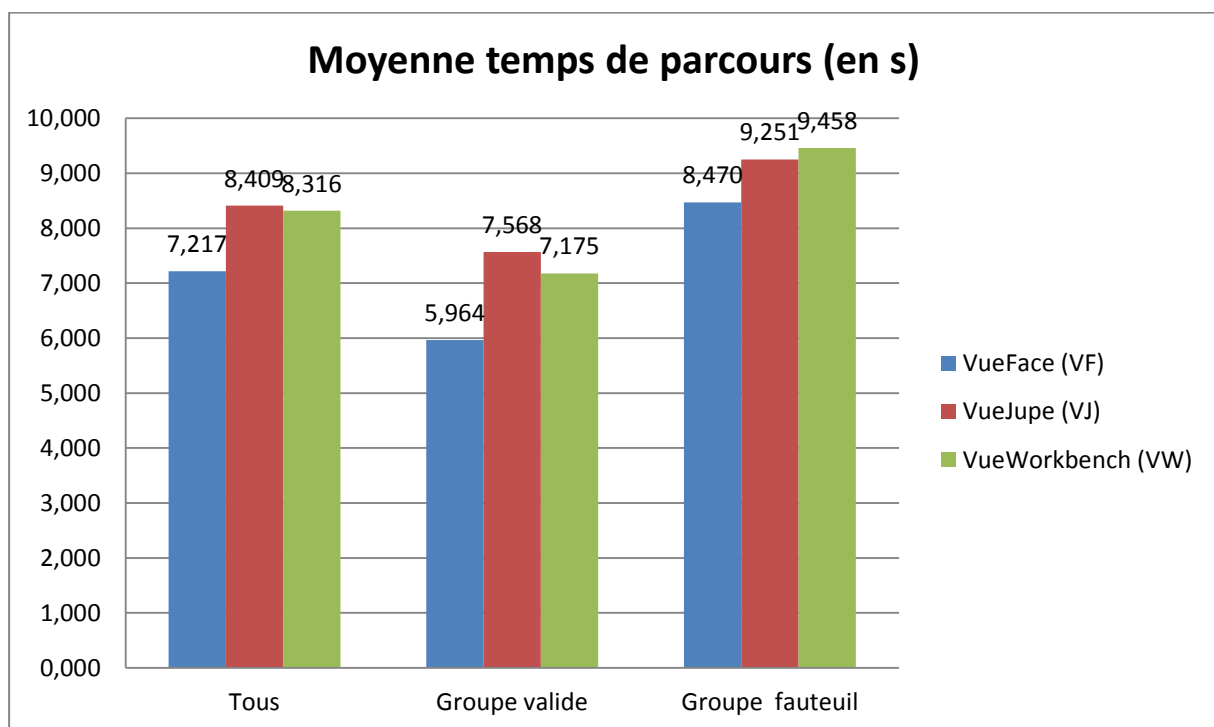
Annexe 3 – Résultats de l'étude concernant les retours visuels

1. Couloir avec descente de marche

Temps de parcours

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,000	0,433	0,003
Groupe valide	0,001	0,621	0,004
Groupe fauteuil	0,047	0,613	0,164

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que la VF par rapport aux deux autres. Cette comparaison peut être effectuée pour l'ensemble des sujets ainsi que pour les valides.



Les comparaisons VF/VW et VF/VJ font apparaître que la VF apporte une meilleure performance en terme de moyenne de temps de parcours.

Pour l'ensemble des sujets, nous notons une amélioration du temps de parcours de l'ordre de la seconde. Le temps de parcours peut être biaisé par le comportement de l'utilisateur : le temps de parcours est très fortement lié à la distance à l'arrêt. Le temps de parcours est donc à rejeter dans cet atelier.

Vitesse moyenne

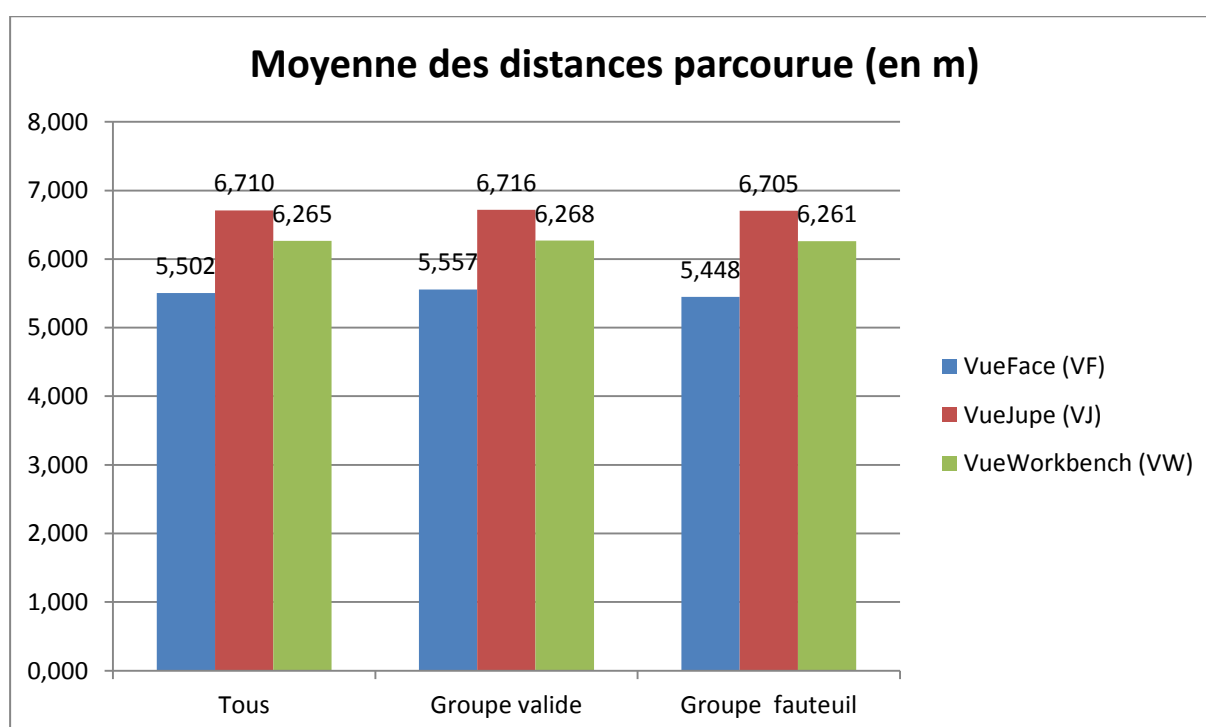
Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,585	0,778	0,541
Groupe valide	0,427	0,703	0,244
Groupe fauteuil	0,845	0,829	0,926

La vitesse moyenne des sujets dans le couloir avec descente de marche n'est pas un bon indicateur. Aucun des résultats n'est significatif ($p > 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).

Distance parcourue

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	1,05E-13	3,58E-11	1,02E-07
Groupe valide	4,94E-06	6,37E-07	4,65E-05
Groupe fauteuil	4,46E-09	1,18E-05	0,000

La distance parcourue par les sujets dans le couloir avec descente de marche semble être un bon indicateur. Tous les résultats sont significatifs ($p < 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).



Pour rappel, la distance à parcourir la plus courte dans cet atelier était de 6.7m. Il faut cependant noter qu'elle peut être biaisée par le comportement de l'utilisateur : la distance parcourue est très fortement liée à la distance à l'arrêt. La distance parcourue est donc à rejeter dans cet atelier.

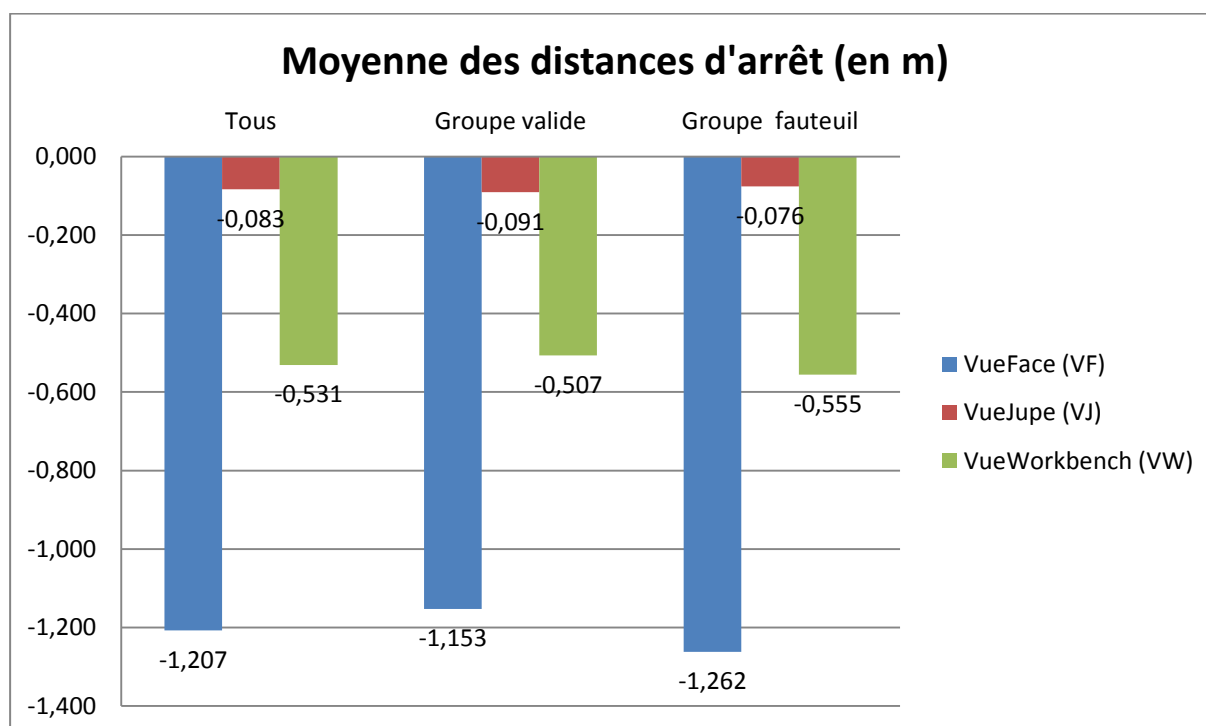
Nombre de collisions

Il n'y a pas de collision dans cet atelier.

Distance d'arrêt

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	1,93E-13	7,15E-14	3,08E-07
Groupe valide	8,85E-06	5,05E-09	5,55E-05
Groupe fauteuil	4,46E-09	2,01E-06	1,08E-03

La distance d'arrêt des sujets dans le couloir avec descente de marche semble être un bon indicateur. Tous les résultats sont significatifs ($p < 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).



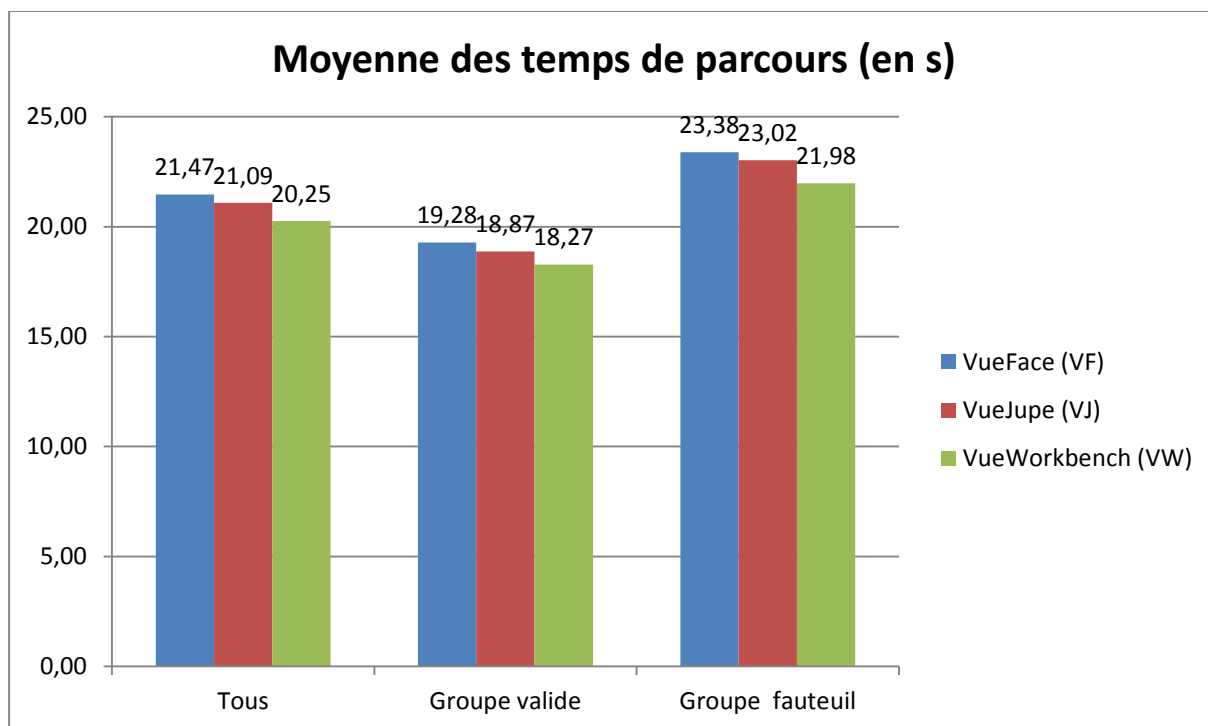
La distance d'arrêt face à la marche est bien meilleure en VJ (8cm en moyenne) qu'en VW (53cm en moyenne) et bien plus qu'en VF (1.2m en moyenne). De plus, le constat est le même pour tous les groupes.

2. Slalom

Temps de parcours

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,479	0,017	0,001
Groupe valide	0,030	0,021	0,000
Groupe fauteuil	0,573	0,277	0,118

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer les résultats que pour le groupe de valides. Nous ne pouvons comparer que la VW par rapport aux deux autres pour l'ensemble des sujets. Enfin, nous ne pouvons comparer les résultats du groupe des UFR.



La moyenne des temps de parcours du groupe des valides sont 18% meilleures.

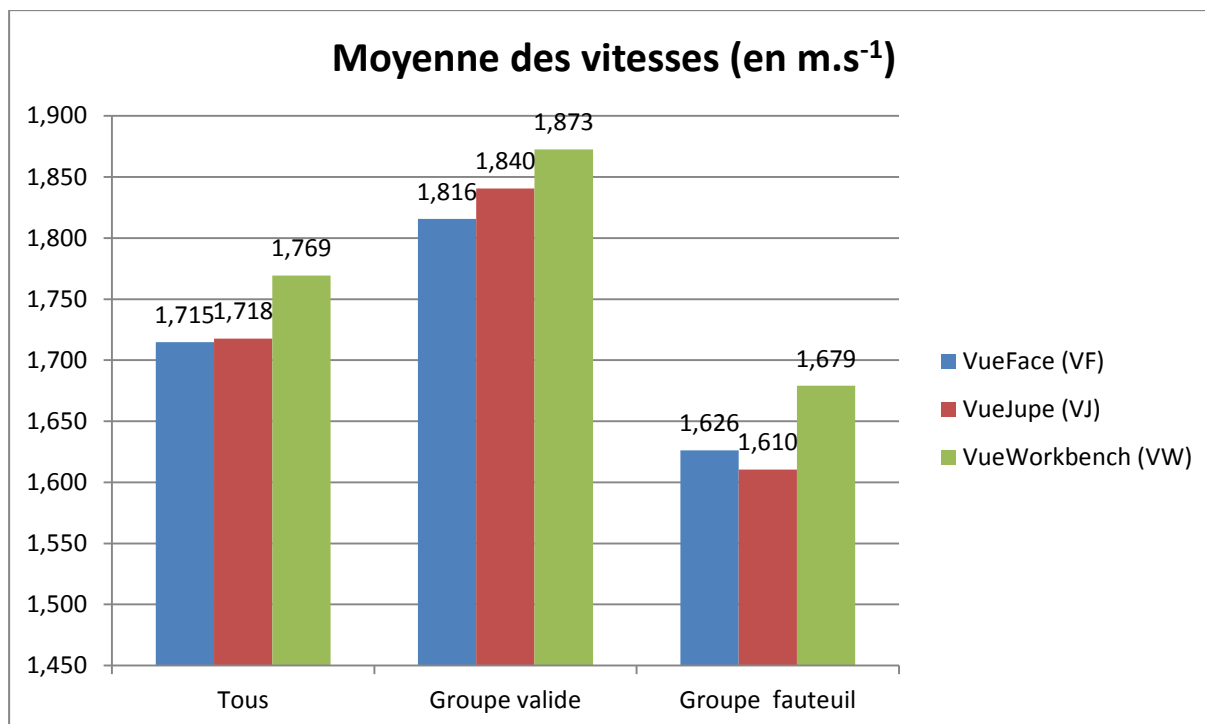
Pour l'ensemble des sujets et pour les valides, il apparait que le temps de parcours est la meilleure en VW (1s de moins pour tous, et 0.6s de moins pour les valides).

Le temps de parcours n'est pas un indicateur suffisant en lui-même.

Vitesse moyenne

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,566	0,038	0,009
Groupe valide	0,034	0,178	0,000
Groupe fauteuil	0,939	0,093	0,132

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que la VW par rapport aux deux autres pour l'ensemble des sujets. De manière similaire, nous ne pouvons comparer que le VF par rapport aux deux autres pour le groupe des valides. Enfin, nous ne pouvons comparer les résultats du groupe des UFR.



Pour l'ensemble des sujets, la VW est la vue qui offre les meilleures performances (1.769m.s⁻¹).

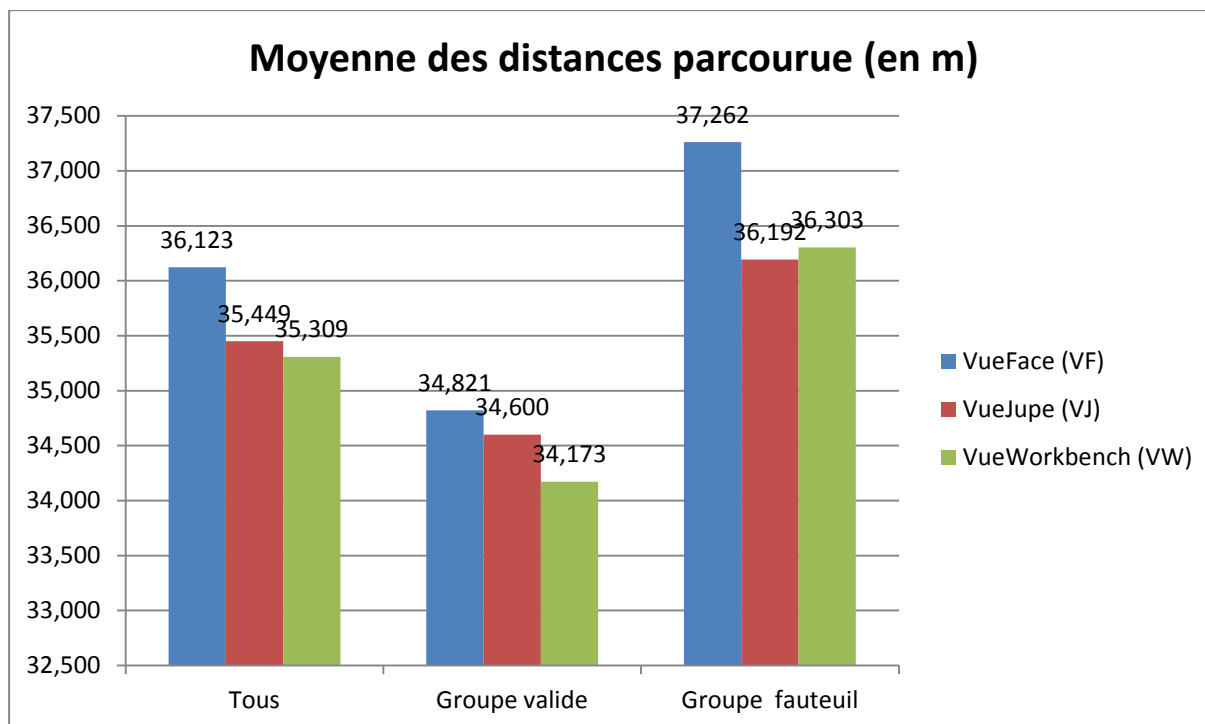
Malheureusement, nous ne pouvons affirmer que les deux autres vues sont équivalentes.

En tant que tel, la vitesse moyenne n'est pas un indicateur suffisant.

Distance parcourue

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,044	0,002	0,000
Groupe valide	0,132	0,001	0,000
Groupe fauteuil	0,077	0,204	0,019

Au vu des résultats, nous pouvons comparer les résultats pour l'ensemble des sujets. A l'inverse, nous ne pouvons comparer que le VW par rapport aux deux autres pour le groupe des valides. De même, nous ne pouvons comparer que le VF par rapport aux deux autres pour le groupe des UFR.



Pour l'ensemble des sujets, la VW permet d'être le plus efficace en terme de distance parcourue (il s'agit ici de la minimiser). La VJ augmente de 0,4% la distance parcourue. Par rapport à la VW, la VF augmente la distance parcourue de 2.3%.

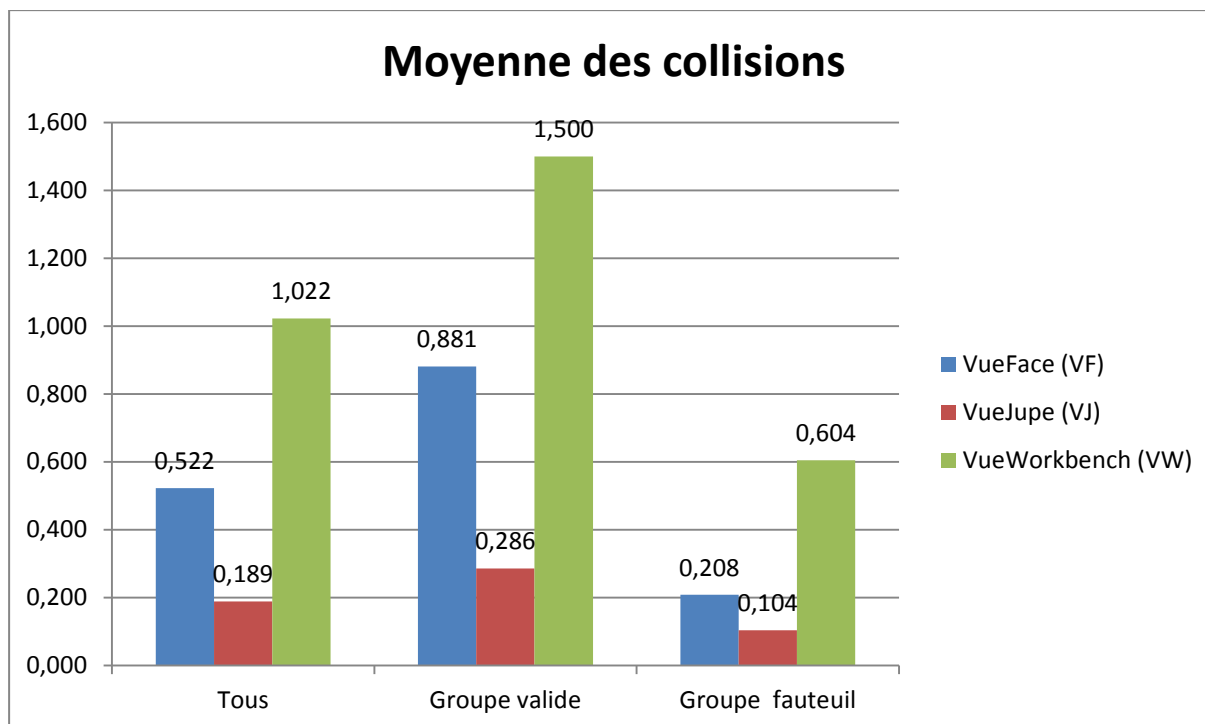
Pour le groupe des valides la VW permet d'avoir de meilleurs résultats. La VJ augmente de 1.2% la distance parcourue, alors que la VF augmente de 1.9% la distance parcourue.

Pour le groupe des UFR, il est seulement possible de dire que la VF augmente la distance parcourue de 2.6% par rapport à la VW.

Nombre de collision

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,002	0,000	0,008
Groupe valide	0,004	0,000	0,055
Groupe fauteuil	0,129	0,002	0,059

Au vu des résultats, nous pouvons comparer les résultats pour l'ensemble des sujets. A l'inverse, nous ne pouvons comparer que le VJ par rapport aux deux autres pour le groupe des valides. De même, nous ne pouvons comparer que le VJ par rapport à la VW pour le groupe des valides.



Pour l'ensemble des sujets, la VJ est la plus efficace car elle réduit significativement la moyenne de collisions (d'un facteur 2 comparé avec la VF et d'un facteur 5 avec la VW) pour le slalom.

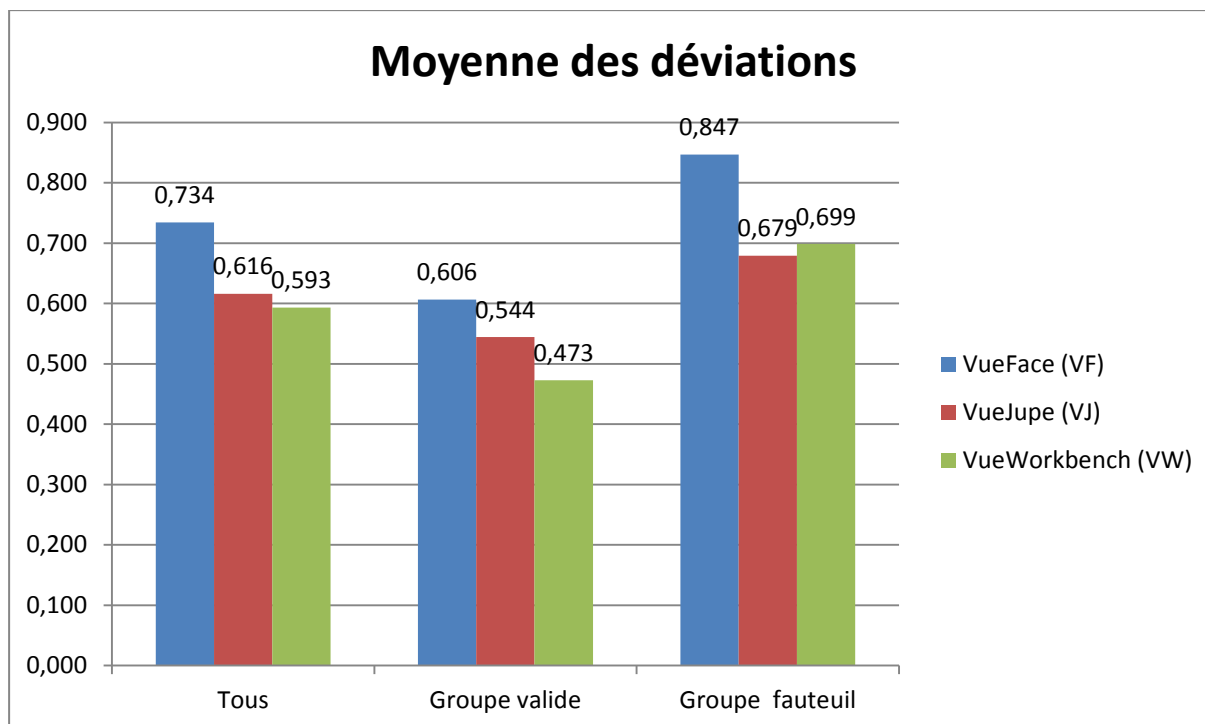
Concernant le groupe des valides, la VJ est plus efficace que les autres vues.

Nous ne pouvons malheureusement pas conclure sur le groupe d'UFR de façon générale.

Déviatiion cumulée

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	6,23E-05	0,012	1,84E-08
Groupe valide	0,005	0,001	1,15E-07
Groupe fauteuil	0,001	0,545	0,002

Au vu des résultats, nous pouvons comparer les résultats pour l'ensemble des sujets ainsi que pour le groupe des valides. Cependant, nous ne pouvons comparer que le VF par rapport aux deux autres vues pour le groupe des UFR.



En prenant tous les sujets, la VF entraîne une plus grande déviation (0.734m en moyenne). Les VJ et VW permettent une meilleure trajectoire mais sans grande différence entre elles (respectivement 0.616m et 0.593m de moyenne).

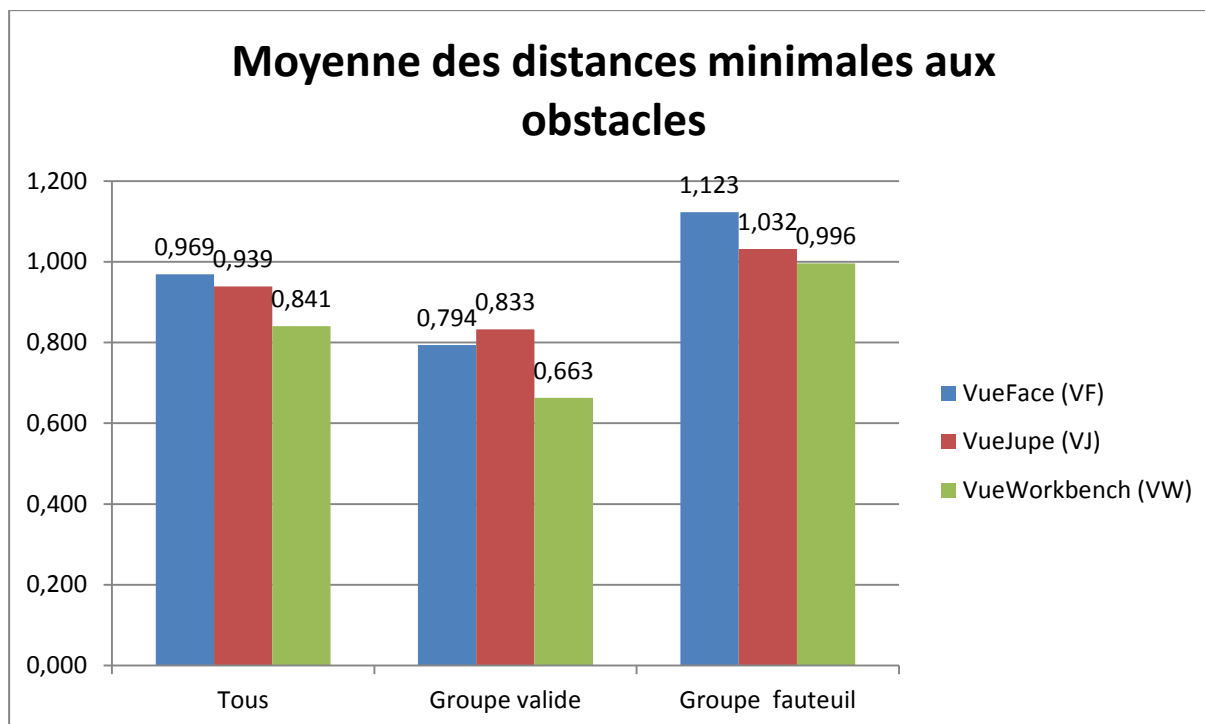
Le même constat peut-être établi pour le groupe des valides, avec un écart plus important de trajectoire entre la VW et la VJ.

Pour le groupe d'UFR, la VJ et VW ne sont pas significativement différentes l'une de l'autre mais permettent une meilleure trajectoire que la VF.

Distance minimale moyenne

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,997	0,000	0,000
Groupe valide	0,350	0,000	0,000
Groupe fauteuil	0,310	0,093	0,042

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que les résultats de la VW par rapport aux deux autres pour l'ensemble des sujets ainsi que pour les valides. Cependant, nous ne pouvons comparer que le VF par rapport à la VW pour le groupe des UFR.



En moyenne, pour le total des sujets, la VW permet de se rapprocher au plus près du plot (0.841m).

Ce constat se retrouve dans le groupe des valides.

Les seules conclusions que nous puissions établir est que la VW permet à tous les sujets de passer au plus près des obstacles.

3. Virage avec passage de portes

Temps de parcours

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,071	0,109	0,782
Groupe valide	0,047	0,265	0,406
Groupe fauteuil	0,408	0,277	0,875

La vitesse moyenne des sujets dans le couloir avec passage de porte n'est pas un bon indicateur. Aucun des résultats n'est significatif ($p > 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).

Vitesse moyenne

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,056	0,086	0,804
Groupe valide	0,027	0,225	0,335
Groupe fauteuil	0,414	0,169	0,761

La vitesse moyenne des sujets dans le couloir avec descente de marche n'est pas un bon indicateur. Aucun des résultats n'est significatif ($p > 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).

Ce point est tout à fait normal vue que la vitesse est un rapport de la distance sur le temps.

Distance parcourue

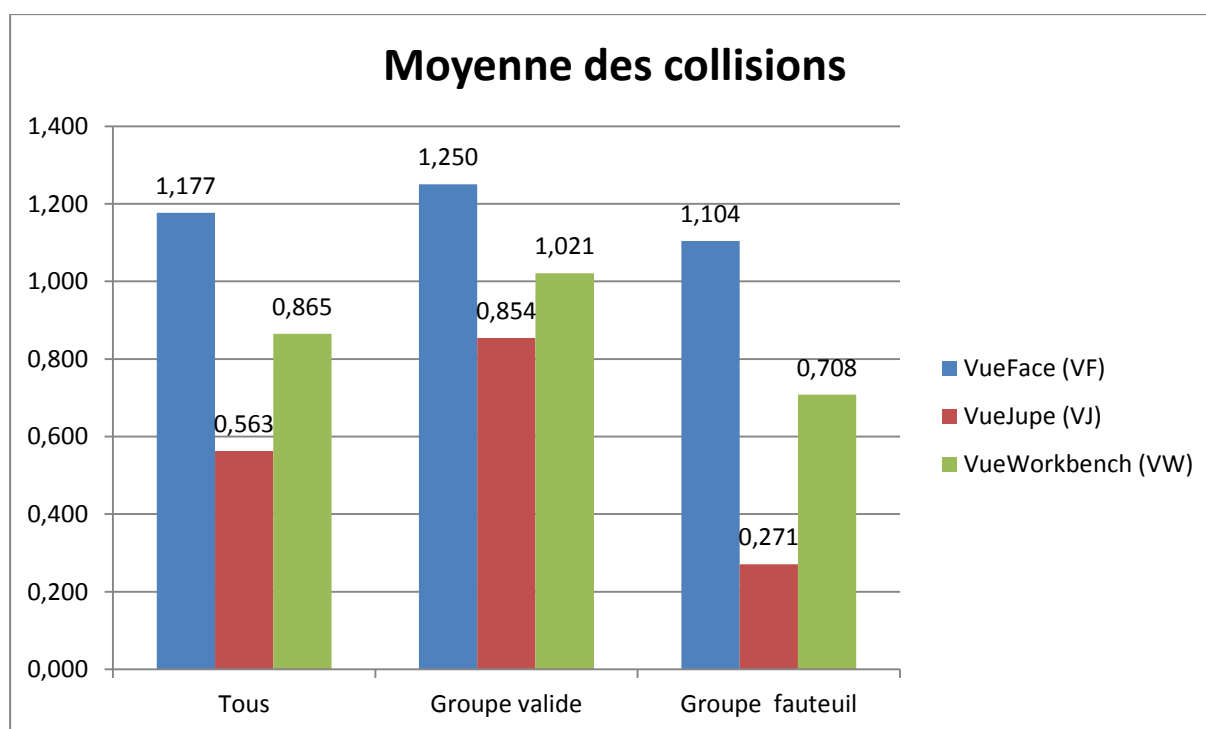
Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,739	0,233	0,155
Groupe valide	0,767	0,545	0,690
Groupe fauteuil	0,397	0,240	0,068

La distance parcourue des sujets dans le couloir avec descente de marche n'est pas un bon indicateur. Aucun des résultats n'est significatif ($p > 0,05$ dans tous les cas pour tous les groupes).

Nombre de collision

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,000	0,043	0,097
Groupe valide	0,194	0,606	0,439
Groupe fauteuil	0,000	0,011	0,112

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que le VJ par rapport aux deux autres vues pour l'ensemble des sujets ainsi que pour le groupe des UFR.

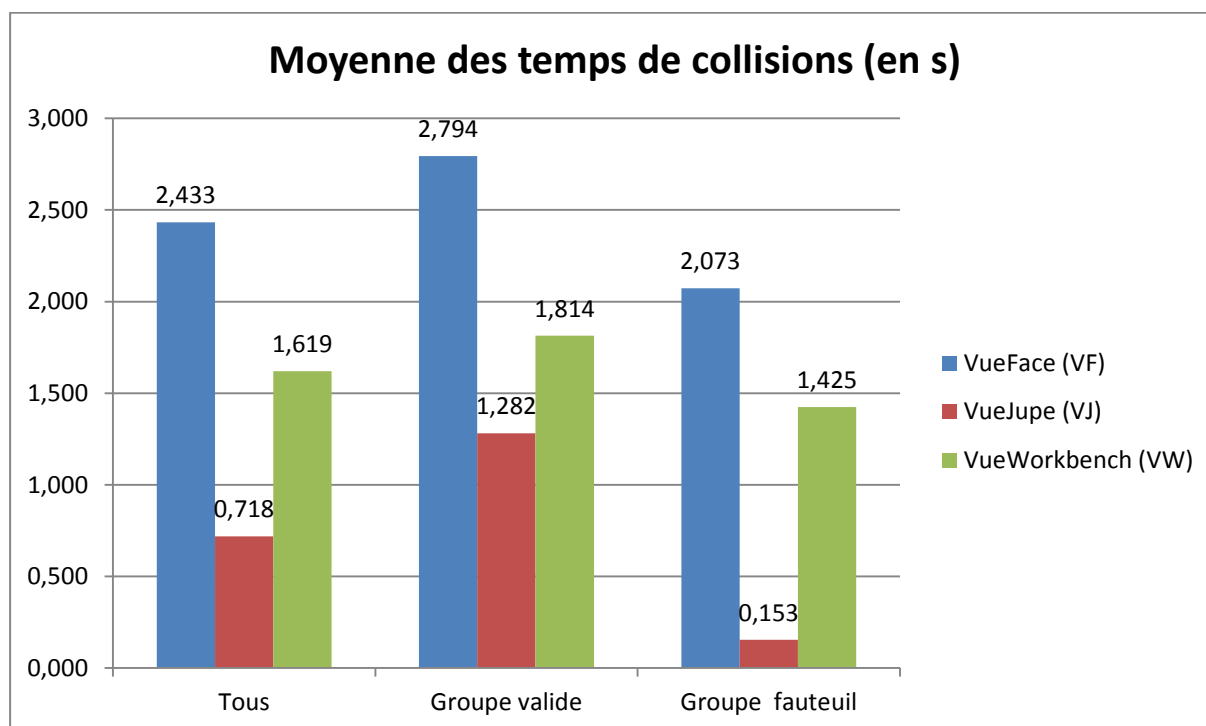


Pour l'ensemble des sujets, la VJ permet de réduire significativement le nombre de collisions lors du virage avec passage de porte. Ainsi, le nombre de collision est réduit de 55% par rapport à la VW et de 62% par rapport à la VF

Temps de collision

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	1,02E-05	0,011	0,075
Groupe valide	0,050	0,284	0,369
Groupe fauteuil	6,20E-06	0,006	0,088

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que le VJ par rapport aux deux autres vues pour l'ensemble des sujets ainsi que pour le groupe des UFR.

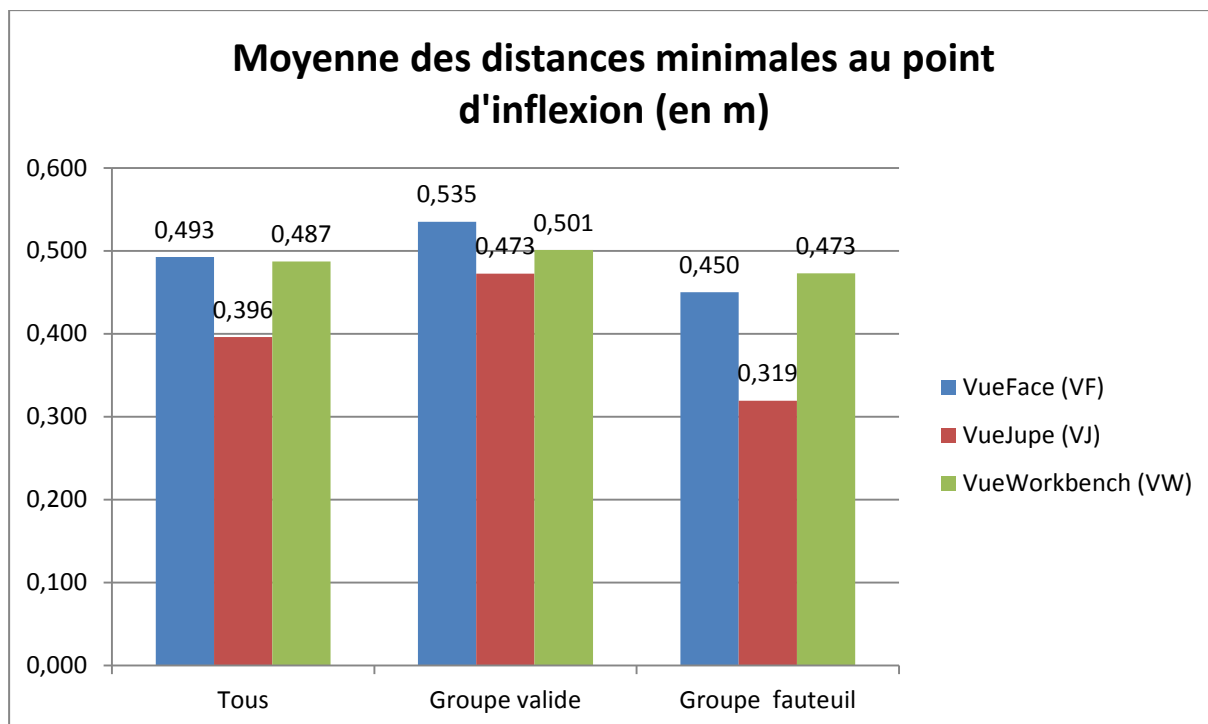


Pour l'ensemble des sujets, la VJ permet de réduire significativement le temps de collisions lors du virage avec passage de porte. Cet indicateur peut être biaisé par le nombre de collisions.

Distance minimale moyenne

Wilcoxon p-value	VueFace/VueJupe	VueJupe/VueWorkbench	VueFace/VueWorkbench
Tous	0,001	0,001	0,962
Groupe valide	0,098	0,290	0,658
Groupe fauteuil	0,002	0,000	0,570

Au vu des résultats, nous ne pouvons comparer que le VJ par rapport aux deux autres vues pour l'ensemble des sujets ainsi que pour le groupe des UFR.



Pour l'ensemble des sujets ainsi que pour les UFR, la VJ permet d'augmenter significativement la distance minimale au point d'inflexion. Ainsi, pour le groupe total, la VW augmente de 19% cette distance alors que la VF l'augmente de 25%.

Bibliographie

- Adamovich, S. V., Fluet, G. G., Tunik, E., & Merians, A. S. (2009). Sensorimotor training in virtual reality: A review. *NeuroRehabilitation*, 25(1), 29–44. doi:10.3233/NRE-2009-0497
- Adelola, I. A., Cox, S. L., & Rahman, A. (2002). Adaptable virtual reality interface for powered wheelchair training of disabled children. In *Proc. 4th Intl Conf. on Disability, Virtual Reality and Assoc. Technologies*, in Sharkey, Sik Lányi & Standen (Eds.) pp (p. 173–180). Consulté à l'adresse http://www.icdvrat.reading.ac.uk/2002/papers/2002_23.pdf
- Afnor. (2011). *Accessibilité et dispositifs d'aide pour les personnes handicapées - Cadre bâti - ERP et bâtiments privés, collectifs ou individuels* (Afnor Editions.). Consulté à l'adresse <http://www.boutique.afnor.org/recueil/accessibilite-et-dispositifs-d-aide-pour-les-personnes-handicapees-cadre-bati-erp-et-batiments-privatifs-collectifs-ou-indi/article/731434/fa091624#info>
- Alshaer, A., Hoermann, S., & Regenbrecht, H. (2013). Influence of peripheral and stereoscopic vision on driving performance in a power wheelchair simulator system. *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. Consulté à l'adresse http://www.hci.otago.ac.nz/pubs/2013_AlshaerHoermannRegenbrecht_ICVRproceedings_Final_Manuscript.pdf
- Aminian, K., & Najafi, B. (2004). Capturing human motion using body-fixed sensors: outdoor measurement and clinical applications. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 15(2), 79–94.
- Ann-Helen Patomella, O. T., Kerstin Tham, O. T., & Anders Kottorp, O. T. (2006). P-drive assessment of driving performance after stroke. *J Rehabil Med*, 38, 273–279.
- Archambault, P. S., Chong, J. N. F., Sorrento, G., Routhier, F., & Boissy, P. (2011). Comparison of powered wheelchair driving performance in a real and in a simulated environment. In *Virtual Rehabilitation (ICVR), 2011 International Conference on* (p. 1–7). IEEE. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5971807

- Archambault, P. S., Routhier, F., Hamel, M., & Boissy, P. (2008). Analysis of movement to develop a virtual reality powered-wheelchair simulator. In *Virtual Rehabilitation, 2008* (p. 133–138). IEEE. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4625149
- Archambault, P. S., Tao, G., Torkia, C., Boissy, P., Lemay, M., Reid, D., ... Woodhouse, J. (2013). Development of a new virtual environment for a power wheelchair simulator: A user-centered approach. In *Virtual Rehabilitation (ICVR), 2013 International Conference on* (p. 216–217). IEEE. Consulté à l'adresse ftp://flash.ict.usc.edu/arizzo/ICVR2013/data/papers/81_PID2887005.pdf
- Archambault, P. S., Tremblay, S., Cachecho, S., Routhier, F., & Boissy, P. (2012). Driving performance in a power wheelchair simulator. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 7(3), 226–233. doi:10.3109/17483107.2011.625072
- Arya, K. N. (2011). A study of effectiveness of wheelchair skill training program (WSTP) in teaching wheelie to occupational therapy students. *Indian Journal of Physiotherapy and Occupational Therapy—An International Journal*, 5(1), 73–76.
- Barfield, W., & Hendrix, C. (1995). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1, 3–15. doi:10.1007/BF02009709
- Barfield, W., Hendrix, C., & Bystrom, K.-E. (1999). Effects of Stereopsis and Head Tracking on Performance Using Desktop Virtual Environment Displays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 237–240. doi:10.1162/105474699566198
- Bezdek, J. C. (1987). *Partition structures: a tutorial*. CRC Press, Boca Raton.
- Bouvier, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur*.
- Braga, R. A. M., Malheiro, P., & Reis, L. P. (2010). Development of a Realistic Simulator for Robotic Intelligent Wheelchairs in a Hospital Environment. In J. Baltes, M. G. Lagoudakis, T. Naruse, & S. S. Ghidary (Éd.), *RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII* (p. 23–34). Springer Berlin Heidelberg. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-11876-0_3

- Cameirão, M. S., Badia, S. B., Oller, E. D., & Verschure, P. (2010). Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 7(1), 48.
- Chabrol, B., Halbert, C., Milh, M., & Mancini, J. (2009). Handicap : définitions et classifications. *Archives de Pédiatrie*, 16(6), 912-914. doi:10.1016/S0929-693X(09)74201-0
- Cooper, R. A., Spaeth, D. M., Jones, D. K., Boninger, M. L., Fitzgerald, S. G., & Guo, S. (2002). Comparison of virtual and real electric powered wheelchair driving using a position sensing joystick and an isometric joystick. *Medical Engineering & Physics*, 24(10), 703-708. doi:10.1016/S1350-4533(02)00111-X
- Cooper, R. A., Wolf, E., Fitzgerald, S. G., Kellerher, A., Ammer, W., Boninger, M. L., & Cooper, R. (2003). Evaluation of selected sidewalk pavement surfaces for vibration experienced by users of manual and powered wheelchairs. *The journal of spinal cord medicine*, 27(5), 468–475.
- Desbonnet, M., Cox, S. L., & Rahman, A. (1998). Development and evaluation of a virtual reality based training system for disabled children. In *Proceedings of The 2nd European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies* (Sharkey P, Rose D, Lindstrom J, eds) (p. 177–182). Consulté à l'adresse http://www.icdvrat.rdg.ac.uk/1998/papers/1998_22.pdf
- Dunn, J. C. (1973). A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters. Consulté à l'adresse <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01969727308546046>
- Ellis, S. R. (1991). Nature and origins of virtual environments: a bibliographical essay. *Computing Systems in Engineering*, 2(4), 321-347. doi:10.1016/0956-0521(91)90001-L
- Ellis, S. R. (1994). What are virtual environments? *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 14(1), 17–22.
- Firoozabadi, S. M. P., Oskoei, M. A., & Hu, H. (2008). A Human-Computer Interface based on Forehead Multi-channel Bio-signals to control a virtual wheelchair. In *Proceedings of the 14th*

Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME) (p. 272–277). Consulté à l'adresse <http://cswww.sx.ac.uk/staff/hhu/Papers/ICBME2008-39art.pdf>

Fougeyrollas, P. (2002). L'évolution conceptuelle internationale dans le champ du handicap: Enjeux socio-politiques et contributions québécoises. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé (PISTES)*, 4(2). Consulté à l'adresse <http://www.pistes.uqam.ca/v4n2/articles/v4n2a12.htm>

Fuchs, P., & Moreau, G. (2003). Le traité de la réalité virtuelle—Volume 1: fondements et interfaces comportementales. *Les presses de l'École des Mines*.

Gacem, A. (2013). *Méthodologie d'évaluation de performances basée sur l'identification de modèles de comportements : Applications à différentes situations de handicap*. UVSQ.

Gacem, A., Nadjar-Gauthier, N., Monacelli, E., Al-ani T., & Oussar, Y. (2012). Behavior Identification for Wheelchair Driver Using the Fuzzy C-Means Classification Method, 861-869. doi:10.1115/ESDA2012-82874

Giroux, I., Faucher-Gravel, A., St-Hilaire, A., Boudreault, C., Jacques, C., & Bouchard, S. (2013). Gambling Exposure in Virtual Reality and Modification of Urge to Gamble. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16(3), 224–231.

Göb, R., McCollin, C., & Ramalhoto, M. F. (2007). Ordinal methodology in the analysis of Likert scales. *Quality & Quantity*, 41(5), 601–626.

Goldstein, E. (2013). *Sensation and perception*. Cengage Learning. Consulté à l'adresse <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=fZnklywcQLwC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Sensation+and+Perception,+Cengage+Learning+&ots=PfLifWlsoT&sig=arpsOvnbvfzETPw9fs0wLJGxKwI>

Goncalves, F., Gacem, A., Rabreau, O., Monacelli, E., Schmid, A., & Malafosse, B. (2012). AccesSim : Outil d'évaluation d'accessibilité. Application pour le développement de FRE. In *Handicap 2012, 7ème congrès sur les aides techniques pour les personnes handicapées, L'interdisciplinarité au service de la personne en quête d'autonomie*. Paris.

- Goncalves, F., Trenoras, L., Monacelli, E., & Schmid, A. (2014a). Motion adaptation on a wheelchair driving simulator. In *Virtual and Augmented Assistive Technology (VAAT), 2014 2nd Workshop on* (p. 17–22). IEEE. Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6799463
- Goncalves, F., Trenoras, L., Monacelli, E., & Schmid, A. (2014b). Simulation de conduite en fauteuil roulant avec une plateforme robotique dynamique. Présenté à Handicap 2014, 8ème congrès sur les aides techniques pour les personnes handicapées, La technologie d'assistance : de la compensation à l'autonomie, Paris.
- Gregory, A. D., Ehmann, S. A., & Lin, M. C. (s. d.). inTouch: interactive multiresolution modeling and 3D painting with a haptic interface (p. 45-52). Présenté à IEEE Virtual Reality 2000, New Brunswick, NJ, USA. doi:10.1109/VR.2000.840362
- Grewe, P., Kohsik, A., Flentge, D., Dyck, E., Botsch, M., Winter, Y., ... Piefke, M. (2013). Learning real-life cognitive abilities in a novel 360°-virtual reality supermarket: a neuropsychological study of healthy participants and patients with epilepsy. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(1), 42. doi:10.1186/1743-0003-10-42
- Gröhn, M., Lokki, T., & Takala, T. (2007). Localizing Sound Sources in a CAVE-Like Virtual Environment with Loudspeaker Array Reproduction. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 16(2), 157-171. doi:10.1162/pres.16.2.157
- Gross, H., Singer, W., Totzeck, M., Blechinger, F., & Aichtner, B. (2005). *Handbook of optical systems* (Vol. 1). Wiley Online Library. Consulté à l'adresse <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527606688.fmatter/summary>
- Grychtol, B., Lakany, H., & Conway, B. A. (2009). A virtual reality wheelchair driving simulator for use with a brain-computer interface. In *Postgraduate Conference in Biomedical Engineering & Medical Physics* (p. 67). Consulté à l'adresse <http://openwetware.org/images/5/5b/Pgbiomed1.pdf#page=80>

- Han, C. S., Kunz, J. C., & Law, K. H. (2002). Compliance Analysis for Disabled Access. In W. J. M. Jr & A. K. Elmagarmid (Éd.), *Advances in Digital Government* (p. 149-162). Springer US. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47374-7_9
- Harrison, A., Derwent, G., Enticknap, A., Rose, F. D., & Attree, E. A. (2000). Application of virtual reality technology to the assessment and training of powered wheelchair users. *ICDVRAT 2000*. Consulté à l'adresse http://centaur.reading.ac.uk/19120/1/ICDVRAT2000_Full_Proceedings_3rd_Conf.pdf#page=46
- Harrison, A., Derwent, G., Enticknap, A., Rose, F. D., & Attree, E. A. (2002). The role of virtual reality technology in the assessment and training of inexperienced powered wheelchair users. *Disability & Rehabilitation*, 24(11-12), 599-606. doi:10.1080/09638280110111360
- Harrison, C. S., Grant, M., & Conway, B. A. (2004). Haptic Interfaces for Wheelchair Navigation in the Built Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5), 520-534. doi:10.1162/1054746042545265
- Harrison, C. S., Grant, P. M., & Conway, B. A. (2010). Enhancement of a Virtual Reality Wheelchair Simulator to Include Qualitative and Quantitative Performance Metrics. *Assistive Technology*, 22(1), 20-31. doi:10.1080/10400430903520223
- Hecht, D., Reiner, M., & Halevy, G. (2006). Multimodal Virtual Environments: Response Times, Attention, and Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5), 515-523. doi:10.1162/pres.15.5.515
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3). doi:10.1167/8.3.33
- Holden, M. K. (2005). Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review. *CyberPsychology & Behavior*, 8(3), 187-211. doi:10.1089/cpb.2005.8.187

- Huff, N., Alba Hernandez, J., Fecteau, M., Zielinski, D., Brady, R., & LaBar, K. S. (2011). Revealing context-specific conditioned fear memories with full immersion virtual reality. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 5, 75.
- Inman, D. P., Loge, K., Cram, A., & Peterson, M. (2011). Learning to drive a wheelchair in virtual reality. *Journal of Special Education Technology*, 26(3), 21.
- Iturrate, I., Antelis, J. M., Kubler, A., & Minguez, J. (2009). A Noninvasive Brain-Actuated Wheelchair Based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(3), 614-627. doi:10.1109/TRO.2009.2020347
- Kalunga, E., Chevallier, S., Rabreau, O., & Monacelli, E. (2014). Hybrid interface: Integrating BCI in Multimodal Human-Machine Interfaces. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE/ASME International Conference on* (p. 530-535). Besançon, France: IEEE.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203-220.
- Kwon, J. H., Powell, J., & Chalmers, A. (2013). How level of realism influences anxiety in virtual reality environments for a job interview. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(10), 978-987. doi:10.1016/j.ijhcs.2013.07.003
- Lee, K. M. (2004). Presence, Explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27-50. doi:10.1111/j.1468-2885.2004.tb00302.x
- Mahajan, H., Spaeth, D. M., Dicianno, B. E., Collins, D. M., Boninger, M. L., & Cooper, R. A. (2011). Comparison of Virtual Wheelchair Driving Performance of People With Traumatic Brain Injury Using an Isometric and a Conventional Joystick. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 92(8), 1298-1304. doi:10.1016/j.apmr.2011.03.011
- Meehan, M., Razzaque, S., Whitton, M. C., & Brooks Jr, F. P. (2003). Effect of latency on presence in stressful virtual environments. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE* (p. 141-148). IEEE.
- Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1191132

- Ministère du Développement Durable. (2010). Consulté à l'adresse <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Textes-de-reference-ERP-Mesures.html>
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni*, 2(9), 45–52.
- Morère, Y., Bourhis, G., Guilmois, G., Taverne, E., & Coulombel, L. (2012). View: a simulator for the training and the evaluation of the control of an electric wheelchair. *AMSE, Series C Modelling, Measurement and Control*, 73(3), 71-82.
- Moschonas, P., Tsakiris, A., & Tzovaras, D. (2013). Automatic Kinodynamic Wheelchair Modelling for Architectural Design Accessibility Assessment. *Assistive Technology: From Research to Practice: AAATE 2013*, 33, 195.
- Murugappan, M., Rizon, M., Nagarajan, R., & Yaacob, S. (2010). Inferring of human emotional states using multichannel EEG. *European Journal of Scientific Research*, 48(2), 281–299.
- Niniss, H., & Inoue, T. (2006). Assessment of driving skills using Virtual Reality: Comparative survey on experts and unskilled users of electric wheelchairs. *Technology and Disability*, 18(4), 217-226.
- Niniss, H., & Nadif, A. (2000). Simulation of the behaviour of a powered wheelchair using virtual reality. In *3rd International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies* (p. 9–14). Consulté à l'adresse http://www.icdvrat.rdg.ac.uk/2000/papers/2000_02.pdf
- Nishiike, S., Okazaki, S., Watanabe, H., Akizuki, H., Imai, T., Uno, A., ... Inohara, H. (2013). The effect of visual-vestibulosomatosensory conflict induced by virtual reality on postural stability in humans. *The Journal of Medical Investigation*, 60, 237.
- O'Connor, T. J., Cooper, R. A., Fitzgerald, S. G., Dvorznak, M. J., Boninger, M. L., VanSickle, D. P., & Glass, L. (2000). Evaluation of a Manual Wheelchair Interface to Computer Games. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 14(1), 21-31. doi:10.1177/154596830001400103
- O'Connor, T. J., Fitzgerald, S. G., Cooper, R. A., Thorman, T. A., & Boninger, M. L. (2001). Does computer game play aid in motivation of exercise and increase metabolic activity during

- wheelchair ergometry? *Medical Engineering & Physics*, 23(4), 267–273. doi:10.1016/S1350-4533(01)00046-7
- O'Connor, T. J., Fitzgerald, S. G., Cooper, R. A., Thorman, T. A., & Boninger, M. L. (2002). Kinetic and physiological analysis of the GAME (Wheels) system. *J Rehabil Res Dev*, 39(6), 627–634.
- Okahashi, S., Seki, K., Nagano, A., Luo, Z., Kojima, M., & Futaki, T. (2013). A virtual shopping test for realistic assessment of cognitive function. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(1), 59. doi:10.1186/1743-0003-10-59
- ONU Enable. (2008). Consulté à l'adresse <http://www.un.org/french/disabilities/index.asp>
- Palmon, O., Oxman, R., Shahar, M., & Weiss, P. L. (2004). Virtual environments as an aid to the design and evaluation of home and work settings for people with physical disabilities. In *Proc. 5th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech., Oxford, UK* (p. 119–124). Consulté à l'adresse http://www.icdvrat.org/2004/papers/S04_N2_Palmon_ICDV RAT2004.pdf
- Pithon, T., Weiss, T., Richir, S., & Klinger, E. (2009). Wheelchair simulators: A review. *Technology and Disability*, 21(1), 1–10. doi:10.3233/TAD-2009-0268
- Ramze Rezaee, M., Lelieveldt, B. P., & Reiber, J. H. (1998). A new cluster validity index for the fuzzy< i> c</i>-mean. *Pattern recognition letters*, 19(3), 237–246.
- Ranky, R., Sivak, M., Lewis, J., Gade, V., Deutsch, J. E., & Mavroidis, C. (2010). VRACK #x2014; virtual reality augmented cycling kit: Design and validation. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (p. 135–138). doi:10.1109/VR.2010.5444798
- Routhier, F., Kirby, R. L., Demers, L., Depa, M., & Thompson, K. (2012). Efficacy and retention of the French-Canadian version of the Wheelchair Skills Training Program for manual wheelchair users: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 93(6), 940–948.
- Sakaguchi, T., Kanamori, T., Katayose, H., Sato, K., & Inokuchi, S. (1996). Human motion capture by integrating gyroscopes and accelerometers. In *Multisensor Fusion and Integration for*

Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on (p. 470–475). IEEE.

Consulté à l'adresse http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=572219

Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266-281.
doi:10.1162/105474601300343603

Sheridan, T. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 120-126.

Silva, A. N., Morere, Y., Naves, E. L. M., de Sa, A. A. R., & Soares, A. B. (2013). Virtual electric wheelchair controlled by electromyographic signals. In *Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2013 ISSNIP* (p. 1-5). doi:10.1109/BRC.2013.6487517

Slater, M., Khanna, P., Mortensen, J., & Insu Yu. (2009). Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29(3), 76-84.
doi:10.1109/MCG.2009.55

Sonar, A. V., Burdick, K. D., Begin, R. R., Resch, E. M., Thompson, E. M., Thacher, E., ... Carroll, J. J. (2005). Development of a virtual reality-based power wheel chair simulator. In *Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference* (Vol. 1, p. 222-229 Vol. 1).
doi:10.1109/ICMA.2005.1626551

Song, C.-G., Kim, J. Y., & Kim, N. G. (2004). A new postural balance control system for rehabilitation training based on virtual cycling. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(2), 200-207. doi:10.1109/TITB.2004.828887

Spaeth, D. M., Mahajan, H., Karmarkar, A., Collins, D., Cooper, R. A., & Boninger, M. L. (2008). Development of a Wheelchair Virtual Driving Environment: Trials With Subjects With Traumatic Brain Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(5), 996-1003.
doi:10.1016/j.apmr.2007.11.030

Steyn, N., Hamam, Y., Monacelli, E., & Djouani, K. (2010). Virtual Reality Platform Design. In *EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*.

- Winance, M. (2008). La notion de handicap et ses transformations à travers les classifications internationales du handicap de l'OMS, 1980 et 2001. *Dynamis*, 28, 377–406.
- Y. Morere, M.A. Hadj Abdelkader, S.M. Meliani, & G. Bourhis. (2011). Powered wheelchair driving analysis on a simulator (p. 679-685). Présenté à Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe (AAATE).
- Yu, I., Mortensen, J., Khanna, P., Spanlang, B., & Slater, M. (2012). Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment-part 2. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 32(6), 36–45.